



SAKARYA
ÜNİVERSİTESİ

SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

Sakarya University Journal of Science



e-issn: 2147-835X

Cilt22 Say12

Volume 22 Issue 2

Nisan / April 2018

<http://www.saujs.sakarya.edu.tr/issue/30829>



Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Sakarya University Journal of Science

Editör Listesi

Editorial Board

Cilt 22 Sayı 2

Volume 22 Issue

2

Baş Editör
Executive Editor

Genel Yayın Yönetmeni
General Publication Director

Emrah Doğan

Sakarya Uni.

Naci Çağlar

Sakarya Uni.

Editörler

Editors

Ahmet Çağatay Çilingir

Sakarya Uni.

Mehmet Nebioğlu

Sakarya Uni.

Alparslan Demir

Sakarya Uni.

Sadık Bağcı

Sakarya Uni.

Beytullah Eren

Sakarya Uni.

Serkan Zeren

Kocaeli Uni.

Cüneyt Bayılmış

Sakarya Uni.

Şevket Gür

Sakarya Uni.

Ertan Bol

Sakarya Uni.

Zafer Barlas

Sakarya Uni.

Kerem Küçük

Kocaeli Uni.

Bölüm Editörleri

Section Editors

Ahmet Aygün

Bursa Teknik Uni.

Maryna Van De Venter

Nelson Mandela M. Uni

Ali Çoruh

Sakarya Uni.

M. İskender Özsoy

Sakarya Uni.

Ali Pınar

Boğaziçi Uni.

Mehmet Ozen

Sakarya Uni.

Ali Sarıbiyık

Sakarya Uni.

Murat Tuna

Sakarya Uni.

Aliye Suna Erses Yay

Sakarya Uni.

Murat Utkucu

Sakarya Uni.

Arif Özkan

Düzce Uni.

Mustafa Alkan

Akdeniz Uni.

Barış Boru

Sakarya Uni.

Mustafa Bozkurt

Sakarya Uni.

Bengü Bayram

Balıkesir Uni.

Mustafa Kurt

Ahi Evran Uni.

Çidem Gündüz

Kocaeli Uni.

Nazan Deniz Yön

Sakarya Uni.

Devrim Akgün

Sakarya Uni.

Nesrin Güler

Sakarya Uni.

Dilek Angın

Sakarya Uni.

Nevra Akbilek

Sakarya Uni.

Emre Tabar

Sakarya Uni.

Nilgün Balkaya

İstanbul Uni.

Faruk Yalçın

Sakarya Uni.

Osman Kırtel

Sakarya Uni.

Fatih Çalışkan

Sakarya Uni.

Özer Uygun

Sakarya Uni.

Halil Yiğit

Kocaeli Uni.

Özgül Keleş

İstanbul Teknik Uni

Hüseyin Aksoy

Sakarya Uni.

Peter Claisse

Coventry Uni.

Hüseyin Pehlivan

Sakarya Uni.

Ramazan Meral

Bingöl Uni.

İdris Cesur

Sakarya Uni.

Sema Salur

Rochester Uni.

İhsan Pehlivan

Sakarya Uni.

Sezgin Kaçar

Sakarya Uni.

İlkay Şişman

Sakarya Uni.

Tahsin Turgay

Sakarya Uni.

İnan Keskin

Karabük Uni.

Tijen Talas Oğraş

TÜBİTAK

Jamal Khatib

Wolverhampton Uni.

Vezir Ayhan



Sakarya Uni.

Mahmut Özacar

Sakarya Uni.

Yılmaz Uyaroğlu

Sakarya Uni.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Gelis/Received</u> 08-08-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 01-08-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.333526	

Sakarya Üniversitesi M-7 binası için yangın simülasyonu ve duman tahliye stratejilerinin incelenmesi

Gökhan Coşkun¹, Üsame Demir*¹, Hakan Serhad Soyhan¹

ÖZ

Bu çalışmada, bina içi hava hızını mümkün olabilecek en az seviyede arttıran farklı duman tahliye senaryoları ve stratejileri FDS yazılımı ile bilgisayar ortamında modellenerek incelenmiştir. M-7 binası pencereleri ve binanın terasındaki ışıklık bölgesinin açık ve kapalı olması durumu ile ışıklık bölgesine duman tahliye fanı eklenmesi durumuna olmak üzere beş farklı senaryo incelenmiştir. Tüm simülasyonlar yangın merdiveni acil çıkış kapıları açık konumda iken çalıştırılmıştır. Bu senaryolar; tüm pencereler kapalı, tüm pencerelerin tek kanatları açık, tüm pencerelerin her iki kanadı açık, tüm pencereler kapalı iken ışıklık penceresi açık ve son olarak ışıklık bölgesinde duman tahliye fanı çalıştırılması durumları olarak sıralanabilir. Simülasyon sonuçları tüm binaya duman yayılımının en uzun sürdüğü senaryonun fanın kullanıldığı durum için ortaya çıktığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Yangın, duman yayılımı ve tahliyesi, yangın simülasyonu

Fire simulation and investigation of the smoke removal strategies for Sakarya University M-7 hall

ABSTRACT

In this study several strategies for smoke removal in M7 building of engineering faculty are developed. In these scenarios the air velocity is kept in the lowest level and the developed model was investigated by using FDS software. Five scenarios were examined depending on windows and skylighting open or close positions, and a case having smoke removal fan mounted in the skylighting area. All simulations were run with evocation doors in open position. Scenarios are; all windows casements are closed, all windows single casements are open, all windows casements are open, skylighting open while all windows casements close and finally with smoke removal fan active at the skylighting area. From the simulation results slowest smoke propagation in the building obtained at the smoke removal fan used case

Keywords: Fire, plume dispersal and removal, fire simulation

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya-gcoskun@sakarya.edu.tr, udemir@sakarya.edu.tr, hsoyhan@sakarya.edu.tr

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yangından ve dumandan korunma önlemlerinin dikkatli bir şekilde planlanması ve uygulanması, yangın anında ortaya çıkabilecek can ve mal kayıplarının büyük oranda engellenmesi açısından büyük öneme sahiptir. Yangın anında hızlı bir şekilde tahliyenin gerçekleşmesi ve yangının itfaiye ekiplerine bildirilmesini sağlayan yangın detektörleri gibi koruyucu önlemler mevcut binalarda sıklıkla uygulanmaktadır. Yangın anında özellikle yoğun plastik içerikli ileri teknoloji cihazlar ve yüksek oranda yanıcı özelliğe sahip kimyasalların yandığı binalarda ortaya çıkabilecek yoğun dumanın dış ortama hızlıca tahliye edilmesinin, hem ortamdaki uzaklaşmaya çalışan insanların sağlığı açısından kritik önem taşıdığı hem de yangına müdahale eden ekiplerin hızlı bir şekilde yangın bölgesine ulaşmasına ve yangını kontrol altına almasına büyük oranda katkı sağlayacağı aşikârdır.

Yangın anında duman tahliyesini kolaylaştıracak havalandırma teknikleri üzerine yapılan çalışmalarda havalandırma sistemlerinin duman tahliyesine büyük bir katkıda bulunabileceği görülmüştür. Fang ve diğ. [1] binalarda duman hareketi ve kontrolü üzerine yaptıkları çalışmada havalandırma sisteminin doğrudan duman yüksekliğini etkilediğini deney ve modellerle inceleyerek detaylandırmışlardır. Jie ve diğ. [2] doğal havalandırma yanında mekanik olarak zorlanmış hava akışı sağlayan duman tahliyesi sistemleri üzerine yaptıkları çalışmada duman tahliyesi hızı ve havalandırma yüksekliğinin etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Duman tahliyesindeki önemli bir gösterge olan Froude sayısını farklı havalandırma yüksekliği, karbonmonoksit (CO) ve duman hızına göre optimum havalandırma yüksekliğini ve hızını tespit etmeye çalışmışlardır. Duman tahliye verimliliğine, havalandırma yüksekliğinin tek başına etkisinin olmadığı ortaya konmuştur. Küçük havalandırma borusu ve yüksek duman tahliye hızlarında, havalandırma yüksekliğinin azalması ve duman tahliye hızının düşmesi ile duman tahliyesinin azaldığı bu çalışmayla ortaya konmuştur.

Son yıllarda gelişen yazılım teknolojileri ile yangın ve duman yayılımının simülasyonlarını yapabilen kodlar üzerine yapılan çalışmalar artmıştır. Bu yazılımlardan biri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) mantığı ile simülasyon

yeteneğine sahip olan Fire Dynamics Simulator (FDS) ve elde edilen sonuç verilerini görselleştirebilen Smokeview olup bu yazılımlar yangın simülasyonları için sıklıkla kullanılmaktadır [3]. FDS yazılımı türbülansın gerçeğe en yakın şekilde modellenmesini sağlayan Large Eddy Simulation (LES) türbülans modelini kullanarak çözüm yaptığı için özellikle duman hareketlerini oldukça gerçekçi bir şekilde modellenebilmektedir [4]. Aynı zamanda deneysel şartlar aslına uygun bir modellenerek FDS yazılımı ile yapılan simülasyonların doğruluğu desteklenmiş ve güvenilirliği tespit edilmiştir [5, 6]. Hua ve diğ. 88 metre uzunluğunda bir kanalda yangından kaynaklı dumanın ve karbon monoksitin yayılımını FDS ile yaptıkları simülasyon çalışması ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar doğrultusunda, karbon monoksit konsantrasyonunun yerden yüksekliği ile doğrusal olarak artacağı ve ateşten uzak mesafelere doğru katlanarak azaldığı belirlenmiştir [6]. Bu durum ancak kat yüksekliğinin aynı kalması durumunda geçerlidir. Dumanın sirayet ettiği diğer oda yada kompartımanların kat yüksekliği değişirse duman yoğunluğu artmaktadır [7]. Olası bina yangınlarının ortaya çıkarabileceği zararlar ve alınması gereken önlemlerin tespiti mevcut her bir bina için deneysel çalışmaların yapılmasının mümkün olmaması nedeniyle oldukça zordur. Bu nedenle bilgisayar simülasyonları yardımıyla olası bir yangın senaryosunu modelleyerek yangının gelişimini ve ilerlemesini incelemek, havalandırma sisteminin ve bina tasarımının etkisiyle farklı davranışlar gösterebilecek duman hareketleri gibi öngörülmesi zor olan kaotik olaylar görselleştirilebilmektedir. 2003 yılında Tayvan'ın Taoyuan şehrinde bulunan 10 katlı, çok odalı biretkinlik ve eğlence salonu bulunan bir otelin 7. katında çıkan yangının gelişimini ve duman yayılımını incelemek amacıyla FDS yazılımı kullanılarak kundaklanmış bir yangın mahalli incelenmiştir. Bu çalışma ile , olay yerinde ısı, duman ve zehirli gazların durumu incelenerek yangın yeri inceleme çalışmalarına destek olunmuştur. Oteldeki yangının gözlemleri ile simülasyon çalışması karşılaştırılmış ve birbiriyle örtüşen neticeler elde edilmiştir [8]. Xu ve diğ. ise bir metro istasyonu ve bir ilköğretim binasında FDS ile yangın simülasyonu yaparak yangından kaçan insanlar için en uygun kaçış rotalarını belirlerken yangın anında yangın kapanlarının yerlerini tespit etmişler ve ayrıca itfaiyecilerin kurtarma çalışmalarını en verimli şekilde yapabilecekleri senaryoları geliştirmişlerdir [9]. Bina

yangınlarında mobilyalar, elektronik eşyalar veya elektrik tesisatlarının yanında otopark gibi yüksek oranda yanıcı malzemelerden oluşan araçlarında yanabileceğini göz önünde bulunduran Zhang ve diğ. büyük bir yeraltı otoparkında yangının yayılmasını ve dumanın hareketini FDS yazılımı kullanarak modelleyerek incelemişlerdir. Simülasyon sonuçları doğrultusunda emniyetli tahliye işlemi için 12 dakikalık süre önermişlerdir [10]. Zhang ve diğ. günlük yaşamda karayolu ulaşımının sıklıkla kullanılmasından dolayı insanlar için daha fazla otobüs gerekli olduğunu düşünerek FDS ile birkaç senaryo için otobüs yangınının sayısal simülasyon çalışmasını yapmışlardır. Kapıların açık ve kapalı olması durumlarına göre ısı yayılım oranının zamana bağlı değişimini incelemişlerdir [11].

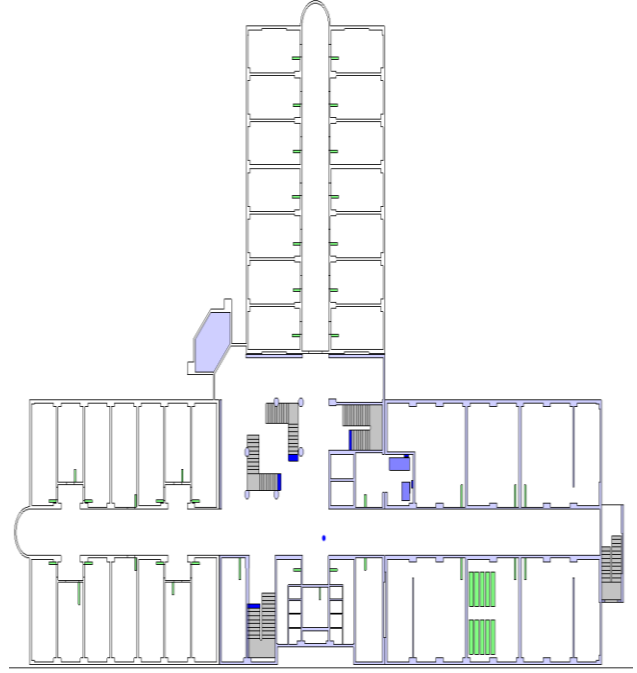
2. MODELLEME PARAMETRELERİ (MODELLING PARAMETERS)

Sakarya Üniversitesi M-7 binasının yangın modelinin oluşturulabilmesi için öncelikle binanın 3 boyutlu CAD modeli oluşturulmuştur. 3 boyutlu CAD modeli oluşturulduktan sonra HAD simülasyonunun yapılacağı ve M7 binasını içeren bir çözüm hacmi belirlenmiştir. Sınırları belirlenen hacim üzerine HAD simülasyonunu yapabilmek için gereken ağ yapısı oluşturulmuştur. Son adımda ise her bir senaryo için hazırlanan modellere aynı sınır koşulları ve malzeme tanımlamaları girildikten sonra simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

2.1.3 Boyutlu CAD Modelin Hazırlanması (Preparing of the 3-D CAD Model)

CAD modelinin oluşturulması için SolidWorks ve PyroSim programlarından yararlanılmıştır. Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dekanlığı tarafından hazırlanmış olan M7 binasının tüm katlarının ayrıntılı teknik resmi kullanılarak SolidWorks programı aracılığıyla 3 boyutlu model oluşturulmuştur. Şekil 1 de yangının çıktığı zemin katın 2 boyutlu görseli verilmiştir. Resimde mavi nokta ile belirtilen yerde dikey bir çizgi üzerinde ağ optimizasyonu için ölçümler alınmıştır. Binada toplam 18 adet

laboratuvar odası, 4 adet bilgisayar laboratuvarı, 69 adet ofis odası, 24 adet sınıf, 12 adet WC bulunmaktadır. 98 adet akademik personel ve 10 adet idari personel binada hizmet vermektedir. Sınıfların dolulukları derslere göre sürekli farklılık göstermekte olduğundan bina içerisinde öğrenci sayıları sürekli değişmektedir. Öğrenci sayısı bir gün içerisinde 250 ile 750 arasında değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 1. M7 Binasında zemin katın 2 boyutlu görseli (2 dimensional model of basement of the M7 building)

Elde edilen taslak model 4 farklı senaryo için tekrar düzenlenmiştir. Bu senaryolar şunlardır:

Senaryo 1: Pencerelerin çift kanatları açık

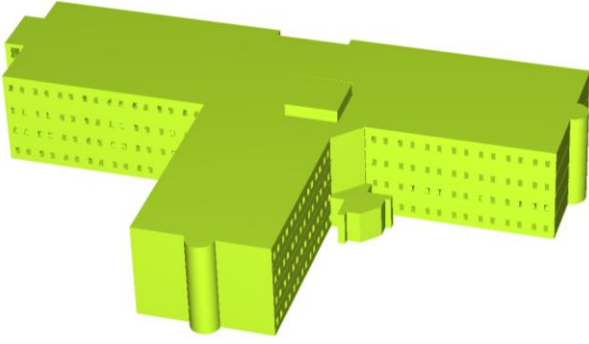
Senaryo 2: Pencerelerin tek kanatları açık

Senaryo 3: Sadece ışıklık penceresi (fiilen mevcut değil fakat senaryo gereği modele eklendi) açık

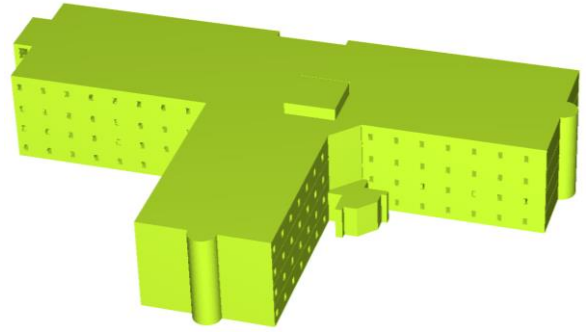
Senaryo 4: Tüm pencereler kapalı

Senaryo 5: Işıklık penceresine duman tahliye fanı eklenmesi (fiilen mevcut değil fakat senaryo gereği modele eklendi)

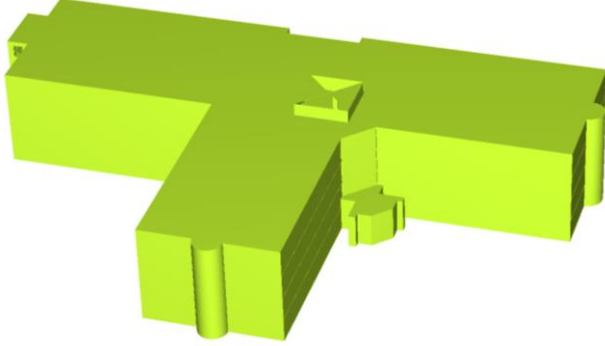
Senaryo 1



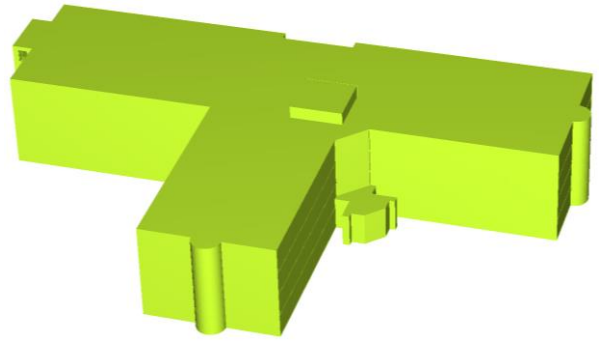
Senaryo 2



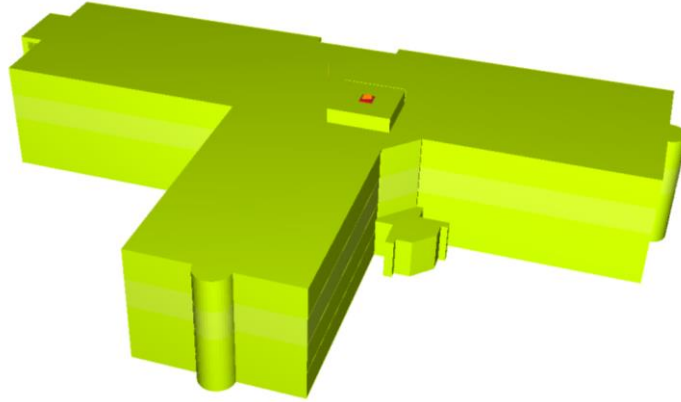
Senaryo 3



Senaryo 4



Senaryo 5

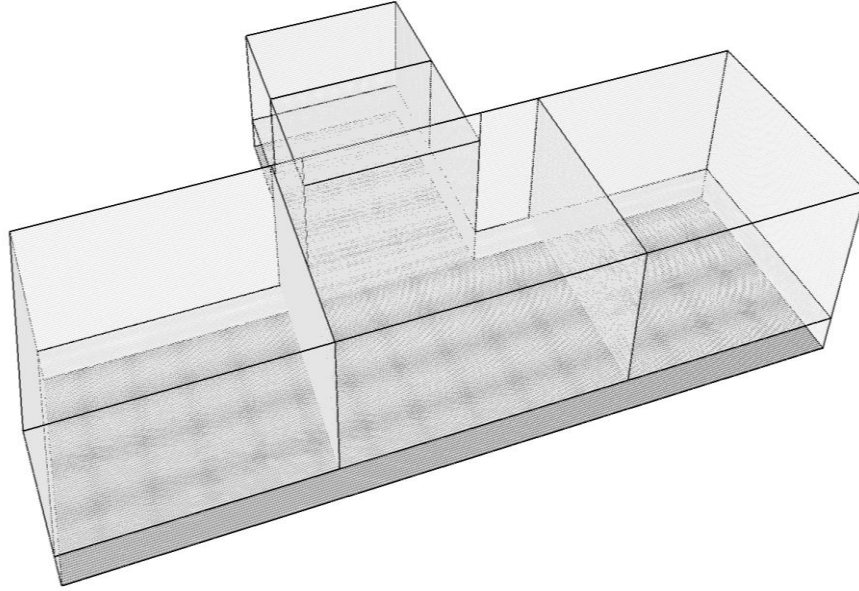


Şekil 2. 5 farklı senaryo için hazırlanan CAD modelleri (CAD models for 5 different scenarios)

2.2. Ağ Yapısının Oluşturulması ve Simülasyon Parametreleri (Mesh Structure and Simulation Parameters)

PyroSim programı açık kaynak kodlu FDS yazılımını içerisinde barındırmakta ve bu yazılım arka planda HAD çözücü olarak çalışmaktadır. FDS temelde yangın modellerini oluşturmak için hazırlanmış bir yazılımdır. Ara yüz olarak çalışan PyroSim yazılımı ile CAD modellerin üzerine ve yangın analizi entegreli paralel çözümler yapılabilir. Bu sebeple tüm modeli bloklardan oluşan ağ yapılarına ayırmak çözüm sırasında paralel işlemcilerin çok daha verimli kullanılmasını sağlamış ve bu sayede toplam

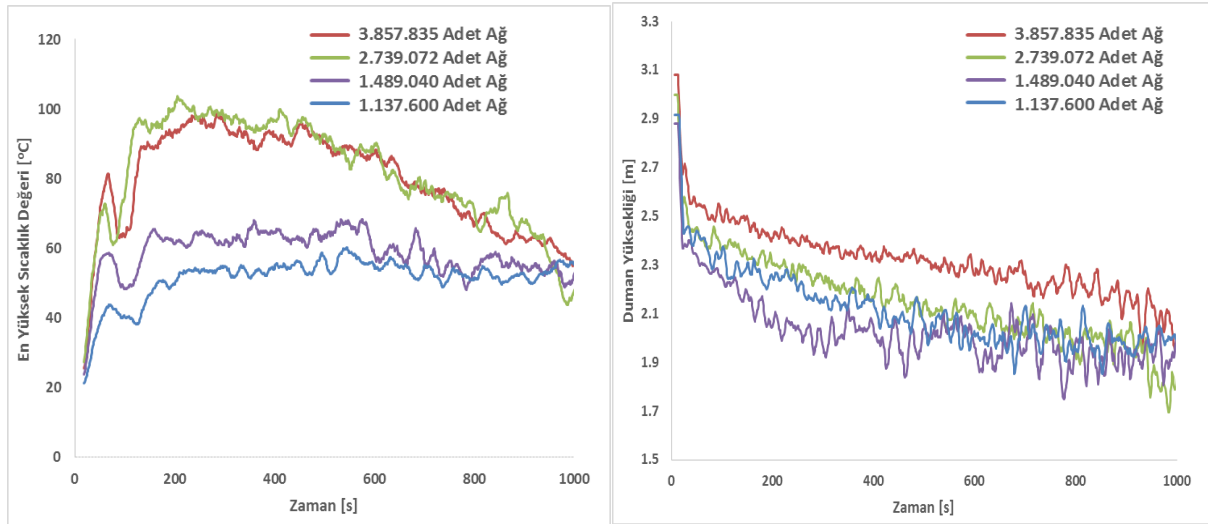
çözüm süresi kısaltılmıştır. Ayrıca binanın yapısı “T” biçiminde olduğu için çözüm yapılmasına gerek olmayan bölgeler silinerek bu hacimlerde ağ yapısı oluşturulmamıştır. Şekil 3’de modelin ağ yapısı verilmiştir ve ağ yapısı oluşturulan hacimlerin dış sınırları siyah çizgiler ile belirtilmiştir. HAD yazılımında akış çözümü LES türbülans modeli ile yapıldığı için yazılım otomatik olarak akış hacmini katı modelden ayırarak bu hacme düzenli (dörtgenel) ağ yapısı oluşturmaktadır. Yazılımın dörtgenel ağ yapısını kullanmasının temel nedeni türbülans modelinin LES olarak uygulanması ve LES türbülans modelinin düzenli ve oldukça yoğun ağ yapısına ihtiyaç duymasıdır. Bu denklemlerle modeldeki kıvrımlı yüzeyler ağ yapısının büyüklüğüne göre dörtgenlere bölünmektedir.



Şekil 3. Oluşturulan ağ yapısı ve dış sınırları (Mesh structure and peripheries)

Yapılan çalışmada modelde farklı yoğunlukta ağ yapıları kullanarak optimum değerde ağ yapısı elde edilmeye çalışılmıştır. Bu sayede model ağ yapısının çözüme etkilerinden bağımsız hale getirilmiştir. Tümü eş dörtgen prizmalardan oluşturulan ağ yapıları için kenarının uzunluğu 0,35 x 0,32 x 0,324 [m] için 1.137.600 adet ağ, 0,3 x 0,3 x 0,32 [m] için 1.489.040 adet ağ, 0,25 x 0,25 x 0,25 [m] için 2.739.072 adet ağ ve 0,22 x 0,2214 x 0,22 [m] için 3.857.835 adet ağ olacak şekilde dört ağ yapısı kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Her bir farklı ağ yoğunluğu için model üzerinde yangının çıktığı sunucu odasının

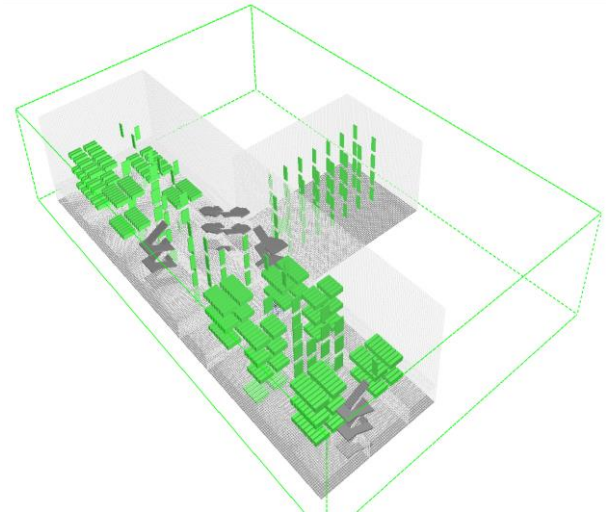
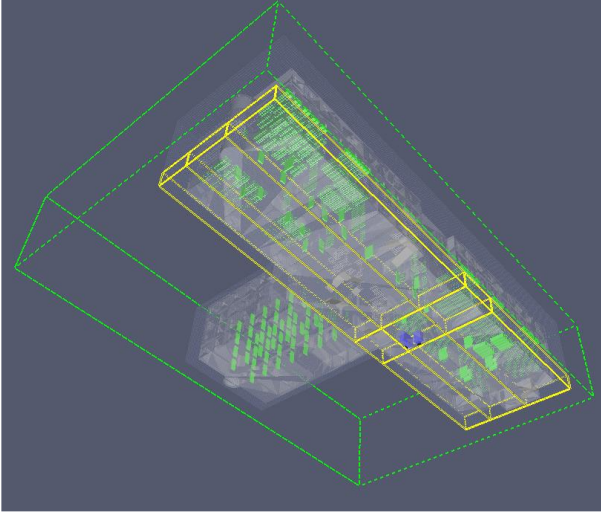
bulduğu koridorun binanın içerisinden başladığı noktadan zemin katın tavanına kadar yerleştirilen, Şekil 1 üzerinde belirtilen, çizgisel bir sensör üzerinden alınan duman yüksekliği ve en yüksek sıcaklık verileri Şekil 4’de görülebilmektedir. Şekil 4’de görülebileceği gibi 2.739.072 ve 3.857.835 adet ağa sahip modellerin sonuçları arasında göz ardı edilebilecek kadar az farklılıklar bulunmaktadır. Bu sebeple tüm simülasyonlar 0,25 x 0,25 x 0,25 [m] ölçülerinde eş dörtgen prizmalardan oluşan 2.739.072 adet ağa sahip hacimsel yapı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 4. Farklı ağ sayıları için zemin kattaki çizgisel sensör üzerinden alınan en yüksek sıcaklık ve duman yüksekliği değerleri (Maximum temperature and smoke layer height values from a linear sensor in the basement for different mesh cell numbers)

Şekil 5’de sıraların, masaların, kapıların ve zemin kattaki ana şalter ve sunucu kabinlerinin (mavi renkte) modele eklendiği binanın tam modelinin farklı açılardaki görüntüleri verilmiştir. Ağ yapısı

oluşturulurken belirtilen katı fazdaki hacimler ve duvarların kapladığı alanlar ağ yapısı hacminden çıkartılarak HAD çözümüne hazır hale getirilmiştir.

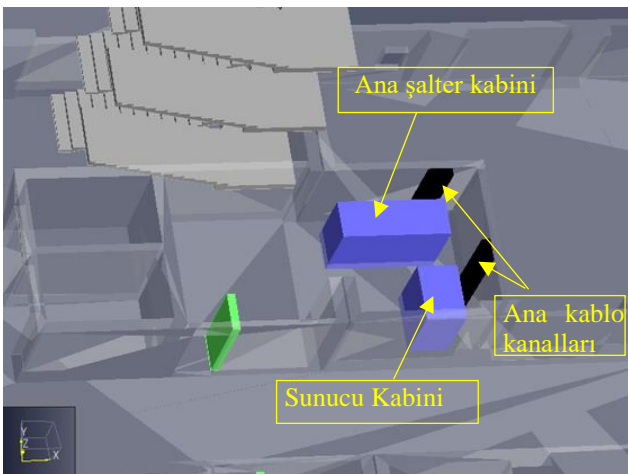


Şekil 5. Ağ yapısı oluşturulmuş binanın tam modeli (Entire model of the building with mesh structure)

2.3. Simülasyon Parametreleri (Simulation Parameters)

Ana şalter ve sunucu kabinleri ve ana kablo kanalları zemin katta yer alan Şekil 6’da görülen odada bulunduğu şekilde ve gerçek boyutlarında çizilerek modele eklenmiştir. Yangının ana şalterden çıkabileceği ihtimalinin daha yüksek olması nedeniyle yangının başlangıç yeri de yine ana şalterler kabininin üst bölgesi olarak tanımlanmıştır.

M-7 binasının duvarları modelde beton malzeme olarak tanımlanmıştır. Model üzerinde sınıflara yerleştirilen sıralara, masalara ve her odanın girişindeki kapılara ise sunta malzeme atanmıştır. Sunucu odasında yer alan elektrik panoları için PVC kablo malzemesi tanımlanmıştır. Tanımlanan malzemelerin yoğunluk, özgül ısı, iletkenlik ve ışınım yayma faktörü değerleri Tablo 1’de görülmektedir.



Şekil 6. Sunucu odasında ana şalter, sunucu kabinleri ve ana kablo kanallarının konumları (Master switch, server cabin and main cable locations in the server room)

Zamana bağlı olarak simülasyonun yapılacağı çalışmada kurgulanan yangın için model 1000 saniye süresince çalıştırılmış ve bu süre zarfında dumanın bina içerisindeki yayılımı incelenmiştir. Sakarya ilinin günlük ortalama nem oranının yaklaşık %70 olduğu tespit edilmiş, yangın esnasından nem oranı %70 olacak şekilde modele girilmiştir [13]. Modelde kullanılan diğer simülasyon parametreleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Ortam parametreleri (Environment Parameters)

Ortam Sıcaklığı	20 °C
Ortam Basıncı	1 atm
Oksijenin kütle oranı	0,232378 kg/kg
Maksimum Görünürlük	30 m
Yer Çekimi İvmesi	9,81 m/s ²

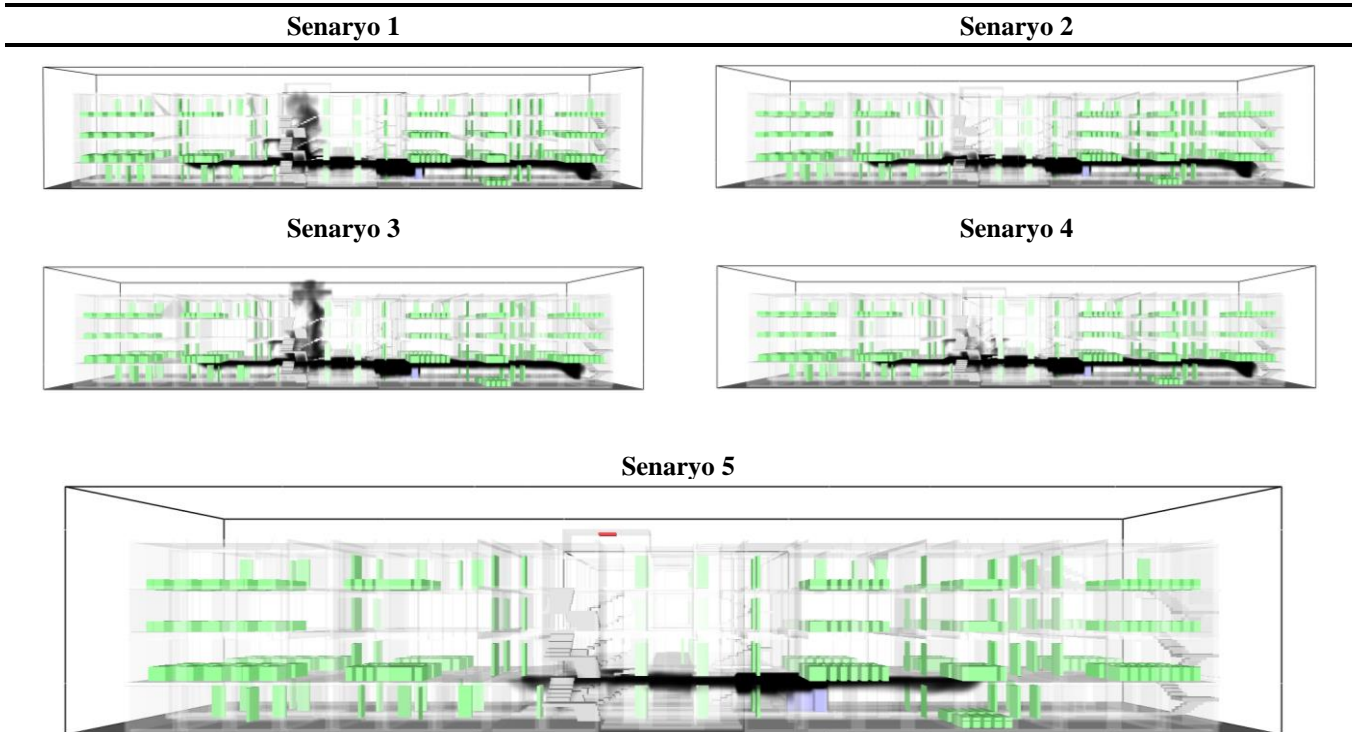
3. SİMULASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Her bir senaryo için 1000 saniye boyunca çalıştırılan simülasyonlar sonucunda bina içerisindeki duman dağılımı ve hava hızlarının zaman bağlı değişimlerinin 100, 300, 500, 700 ve 1000 saniye sonraki durumları görsel olarak elde edilmiştir. Ayrıca bina içerisindeki ortalama ısı yayılım oranı da yine zamana bağlı olarak bir grafik ile verilmiştir.

3.1. Farklı Senaryolar İçin Bina İçerisindeki Duman Dağılımının İncelenmesi (Investigation of Plume Dispersal in the Building for Different Scenarios)

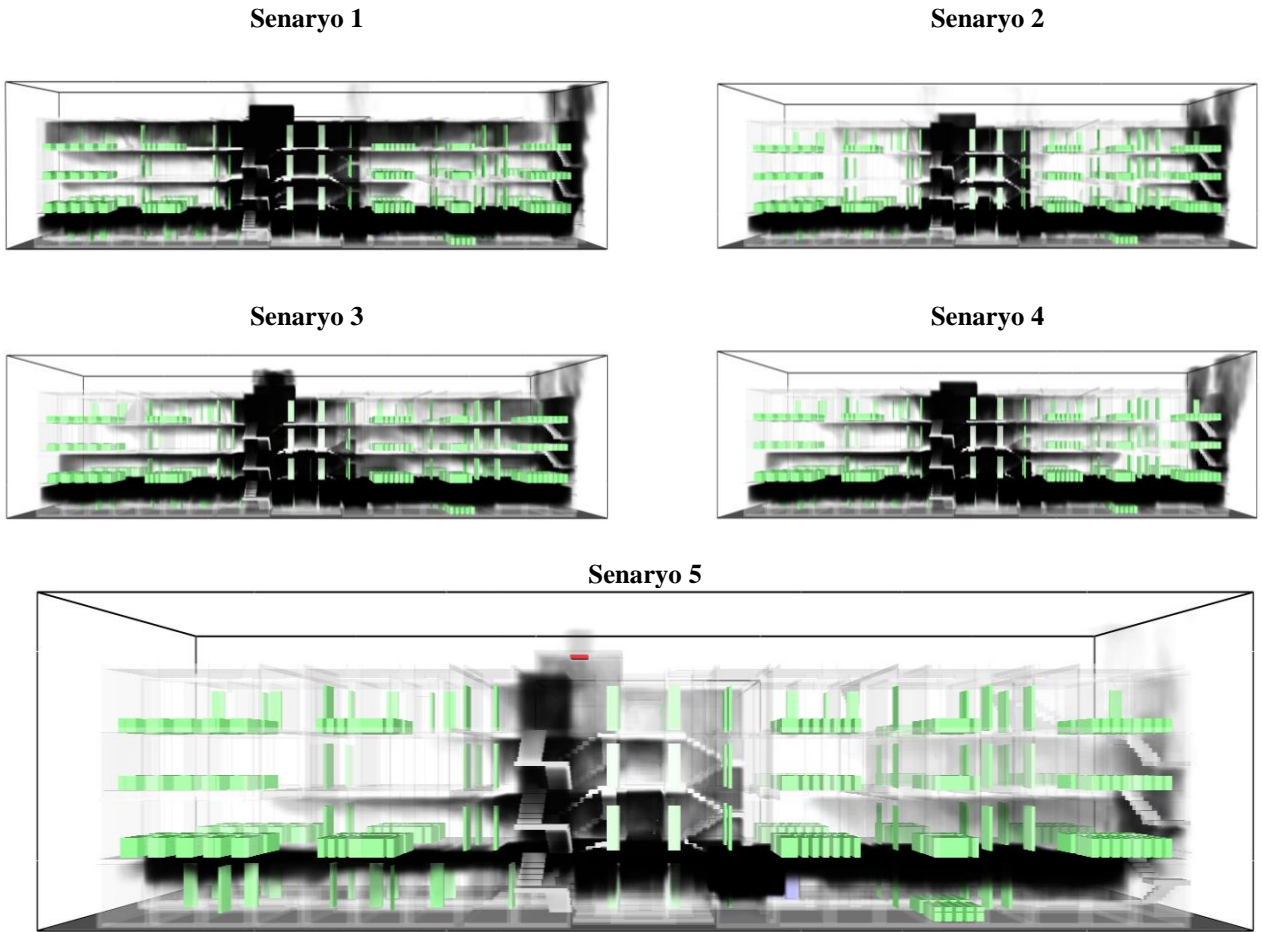
Yapılan simülasyonlar sonucunda elde edilen verilere göre M7 binasındaki sunucu odasında çıkacak yangın neticesinde bina içerisinde dumanın yangın başlangıcından 100 saniye sonraki durumu Şekil 7’de görülmektedir. Buna göre senaryo 1,3 ve 4’de duman yukarı yönde

bulabildiği ilk boşluklardan ilerleyerek binanın son katındaki ışıklık penceresine ilerlemeye başlamıştır. Aynı zamanda zemin katta simülasyon boyunca açık olduğu varsayılan acil çıkış kapısına doğru ilerlediği de gözlemlenmektedir. Senaryo 5’e eklenen duman detektörüne 44. saniyede duman ulaşmaktadır ve böylece detektörün gönderdiği sinyal ile fan aktif hale gelmiştir. 44. Saniyeden sonra fan sürekli olarak çalışmış ve saniyede 18 m³ havayı binadan dışarı tahliye etmiştir. 100. saniyede fanın kullanıldığı senaryoda dumanın diğerlerine göre daha az ilerlediği görülmektedir. Bu durumun fanın bina içerisinden dış ortama sürekli hava pompalayarak hava sirkülasyonunu arttırdığı ve koyu duman oluşumu azalttığı görülmüştür. Yangının çıktığı ana şalter odasının dış ortamla tek bağlantısı giriş kapsıdır ve içeride herhangi bir havalandırma sistemi mevcut değildir, bu sebeple fanın çalışması ile ana şalter odasında oluşan vakum etkisinin yangını besleyecek taze havanın oda içerisine girmesini bir miktar engellediği de gözlenmiştir. Çatı bölgesine açılan pencerenin baca etkisi gördüğü ve bu senaryoda dumanın çatıya diğerlerine göre daha hızlı ulaştığı açıktır. Tüm pencerelerin kapalı olduğu senaryoda ise bina içi hava hızının düşük olmasından dolayı duman tabakasının daha yavaş ilerlediği simülasyon sonuçlarından anlaşılmıştır.



Şekil 7. 100’üncü saniyedeki dumanın bina içerisindeki dağılımı (Plume dispersal in the building after 100 s)

Şekil 8’de 300’üncü saniye için fanlı modelin dışında tüm senaryolarda zemin katlarda dumanın yoğun bir şekilde yayıldığı görülmektedir. Bu durumda zemin kattan yangın merdivenlerine ulaşmanın mümkün olmayacağı anlaşılmaktadır. En yoğun ve hızlı duman yayılımı tüm pencerelerin açık olduğu senaryoda oluşurken en az dağılım fanın çalıştığı senaryo 5’de ortaya çıktığı görülmektedir. Beklenmedik bir şekilde pencerelerin tek kanatlarının açık olduğu durumda dumanın en az dağıldığı ikinci senaryo olmuştur ki bu durumun tüm pencerelerin kapalı olduğu senaryo 4’de ortaya çıkması daha olasıdır. Üst havalandırma penceresinin kullanıldığı senaryo 3’ün ise dumanın en hızlı yayıldığı ikinci durum olduğu ortaya çıkmıştır. Böylece M7 binası için ışıklık bölgesine pencere açmanın duman tahliyesine olumlu bir etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır.



Şekil 8. 300 saniye sonra dumanın bina içerisindeki dağılımı (Plume dispersal in the building after 300 s.

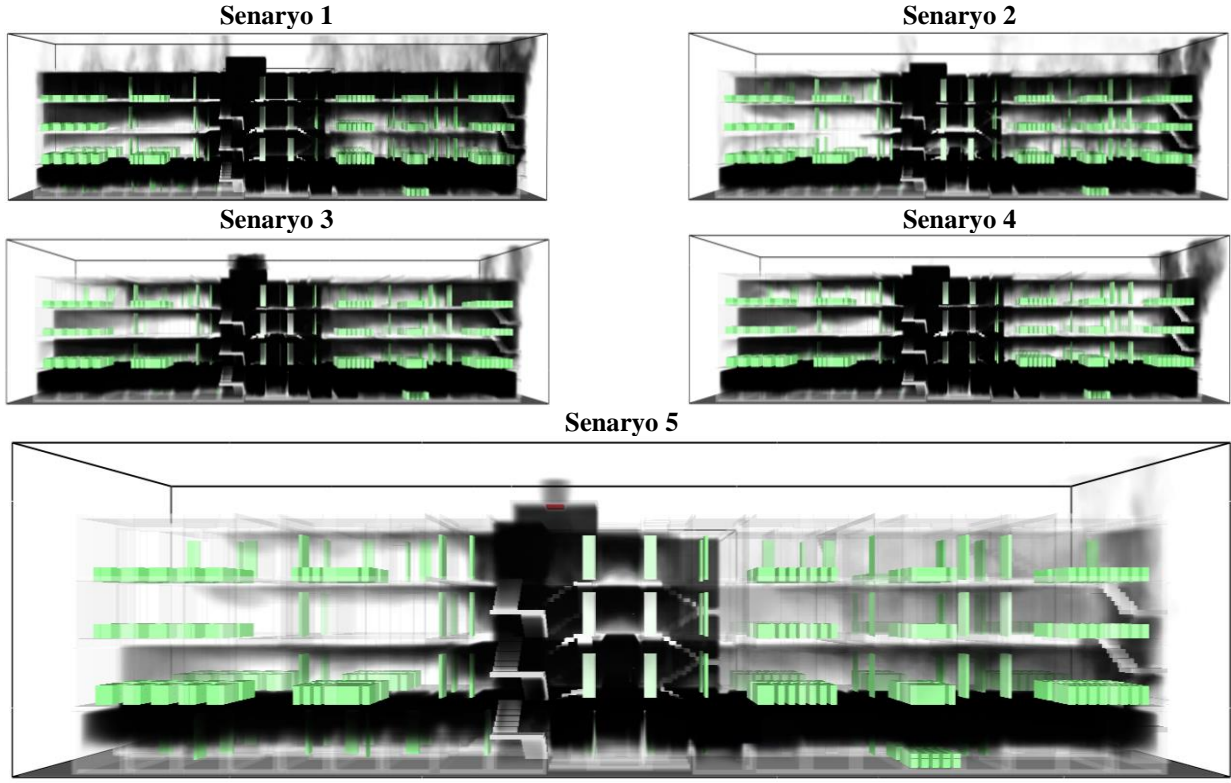
Şekil 9’da 500’üncü saniye için tüm senaryolarda zemin katlarda dumanın tamamen yayıldığı görülmektedir. Tüm pencerelerin açık olduğu senaryo 1 ve fanın çalıştırıldığı senaryo 5 dışında

kalan durumlardaki duman dağılımlarının benzerlik gösterdiği sadece pencerelerin yarı açık olduğu durum için en üst katta daha fazla duman yoğunluğu olduğu görülmektedir. Senaryo 1 de 1. Kat dışında tüm katlarda dumanın oldukça yoğun

olduğu görülürken fanın çalıştırıldığı senaryoda zemin kat dışındaki tüm katlarda dumanın ince bir sis tabakası halinde bulunduğu ve bu dumanında fanın vakum etkisiyle acil durum kaçış kapılarından içeri girdiği anlaşılmaktadır.

Simülasyonlarda acil durum kapıları sürekli açık tutulmuştur fakat 500 saniyeye kadar bina

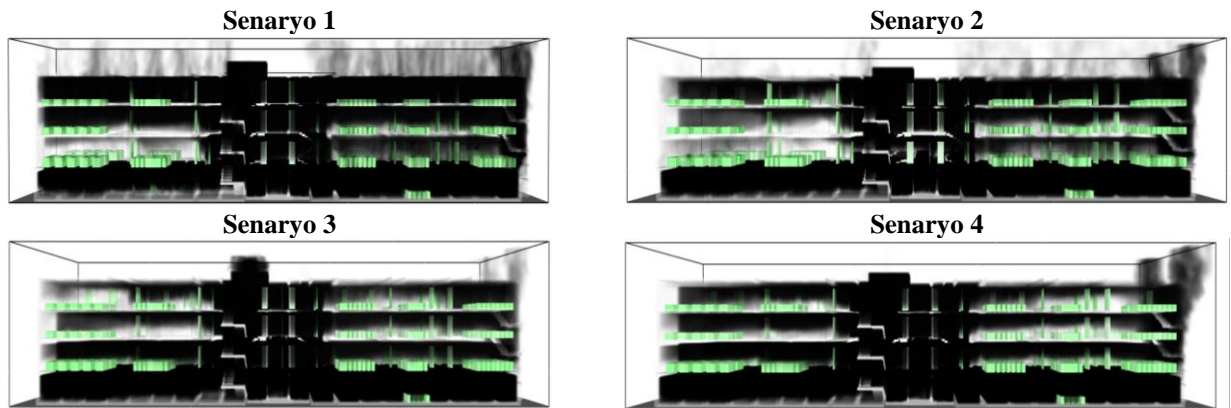
boşaltılmış olsaydı kapılarda otomatik kapatma sistemi olduğundan kapalı konuma geçecek ve böylece yangın merdivenindeki duman bina içerisine tekrar geri giremeyeceğinden yangın merdiveninde duman bulunmayacağı görülmüştür.



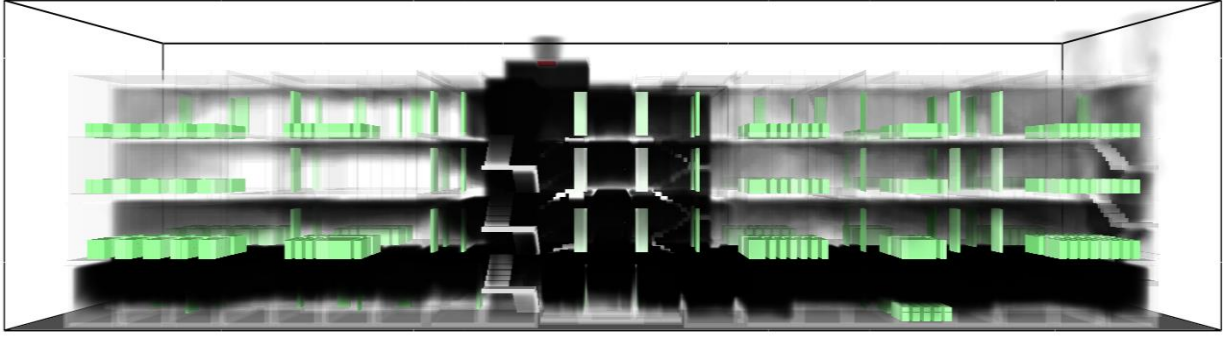
Şekil 9. 500 saniye sonra dumanın bina içerisindeki Dağılımı (Plume dispersal in the building after 500 s.)

Şekil 10'da 700'üncü saniyede fanın çalıştırıldığı senaryo dışındaki tüm senaryolarda dumanın tüm katlarda oldukça yoğunlaştığı görülmektedir. Fanlı senaryoda birinci kat dışında hala diğer katlarda

binadan kaçışa ve yangına daha hızlı müdahale etmeye imkân verebilecek şekilde duman yoğunluğunun az olduğu görülmektedir.



Senaryo 5

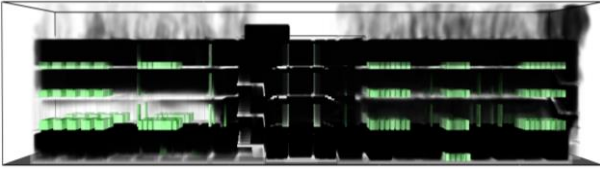


Şekil 10. 700 saniye sonra dumanın bina içerisindeki dağılımı (Plume dispersal in the building after 700 s.)

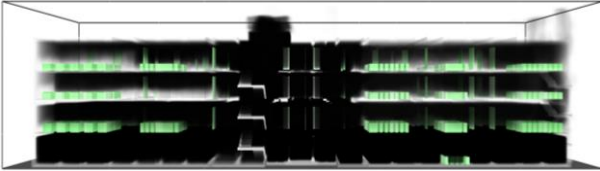
Şekil 11’da yangın başlangıcından 1000 saniye sonra bina içerisindeki duman dağılımının son hali görülmektedir. Bu süre sonunda en yoğun duman birikiminin tüm pencerelerin kapalı olduğu durum

için olduğu bunun yanında en az duman birikiminin fanın çalıştırıldığı senaryoda ortaya çıktığı görülmektedir.

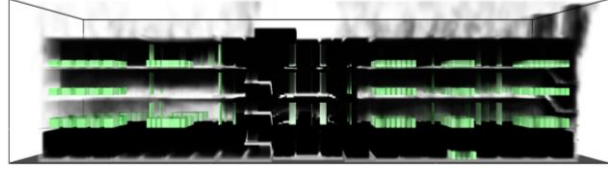
Senaryo 1



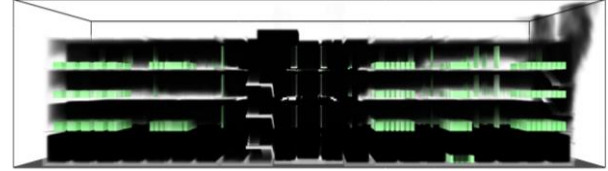
Senaryo 3



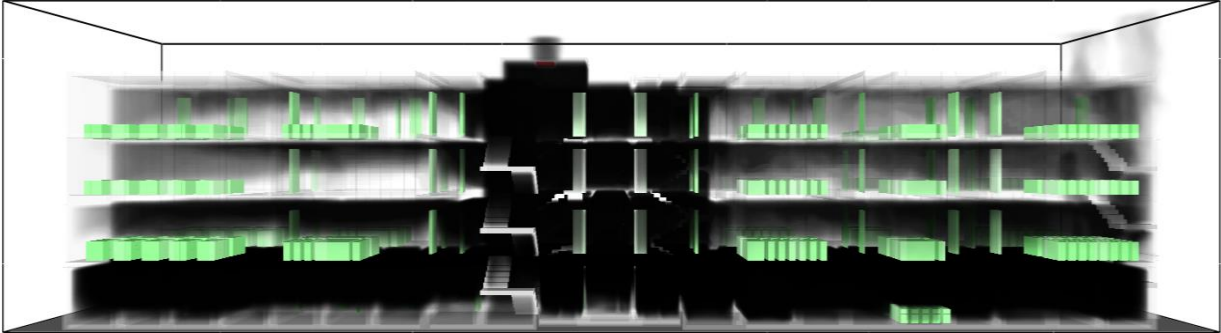
Senaryo 2



Senaryo 4



Senaryo 5

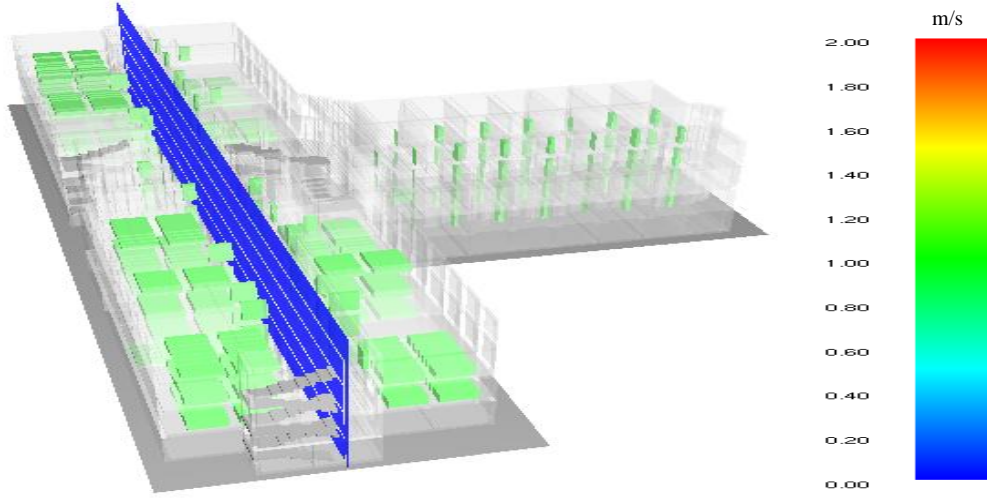


Şekil 11. 1000 saniye sonra dumanın bina içerisindeki dağılımı (Plume dispersal in the building after 1000 s.)

3.2. farklı Senaryolar İçin Bina İçerisindeki Gazların Akış Hızının İncelenmesi (Investigating Of Gas Flow Velocities In The Building For Different Scenarios)

Beş senaryo için yangının başlangıcından itibaren bina içerisindeki gazların akış hızlarının dağılımı binayı dik kesen 2 boyutlu bir yüzey üzerinden alınan kesit görüntüsü ile verilmiştir. Şekil 12’de

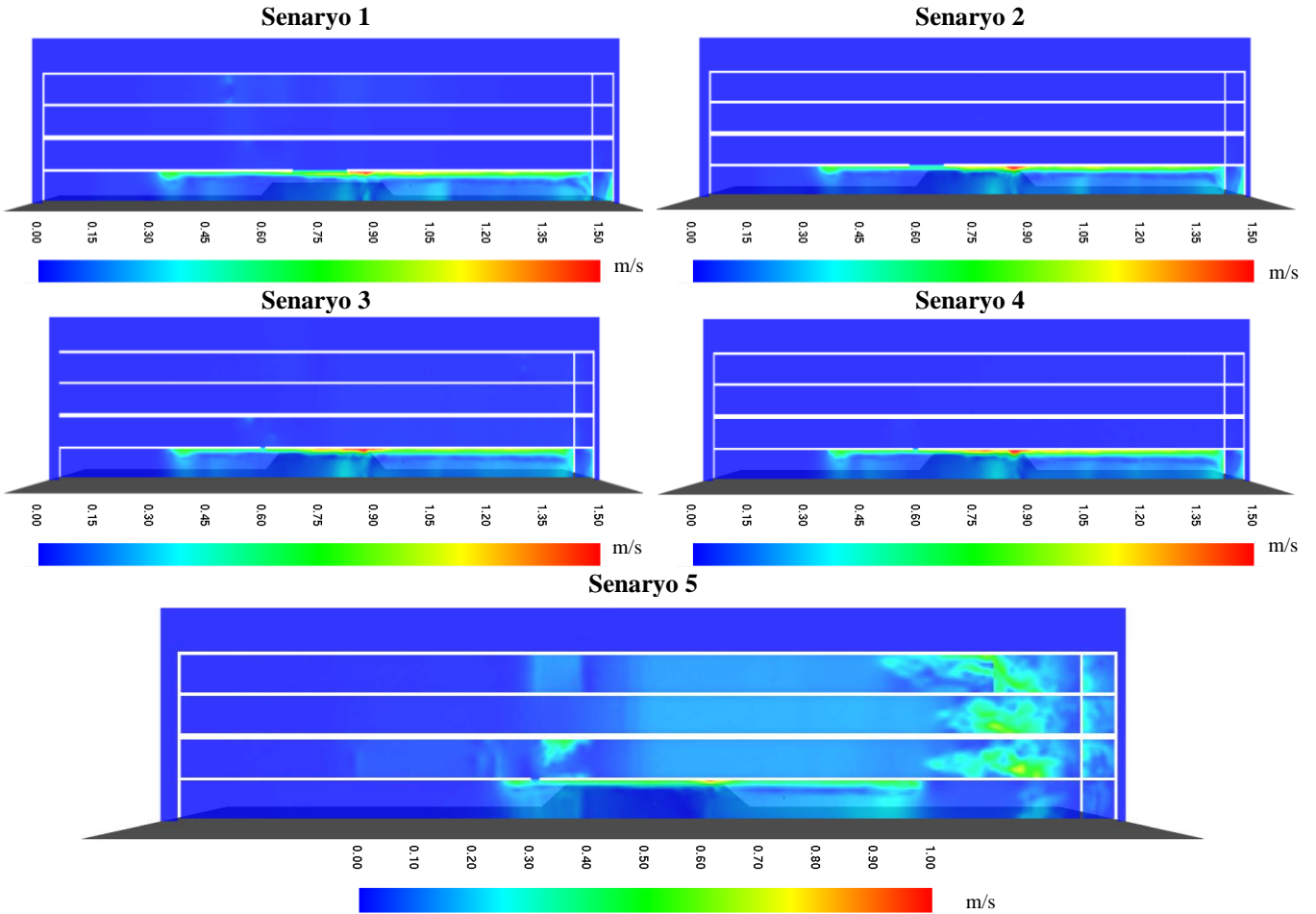
görüldüğü üzere yangının çıktığı odanın bağlandığı koridor üzerinden alınan kesit görünümü ayrıca yangın merdivenini de kapsamaktadır. Belirtilen kesitteki gazların hareketlerinin yangının ve dumanın bina içerisinde dağılımının irdelenmesi açısından önemli olduğu düşünülmektedir. Bina içerisindeki gazların akış hızı verileri simülasyonda tanımlandığı şekliyle havayı oluşturan O_2 ve N_2 ’nin yanında dumanın hızını da temsil etmektedir.



Şekil 12. Bina içerisi gazların akış hızı dağılımının alındığı kesit görüntüsü (Sectional view of where gas flow distribution obtained in the building)

Şekil 13’de 100’üncü saniye için gazların hızının zemin katlarda ve zemin katların tavanlarında artmaya başladığı, üst katlarda ise fanın çalıştırıldığı senaryo 5 dışında hava hareketlerinin çok daha düşük hızlarda olduğu görülmektedir. Senaryo 5’de fanın çalışmasıyla birlikte yangın merdivenlerine çıkan kapılardan bina içerisine hava girişinin olduğu hava hızlarından anlaşılmaktadır.

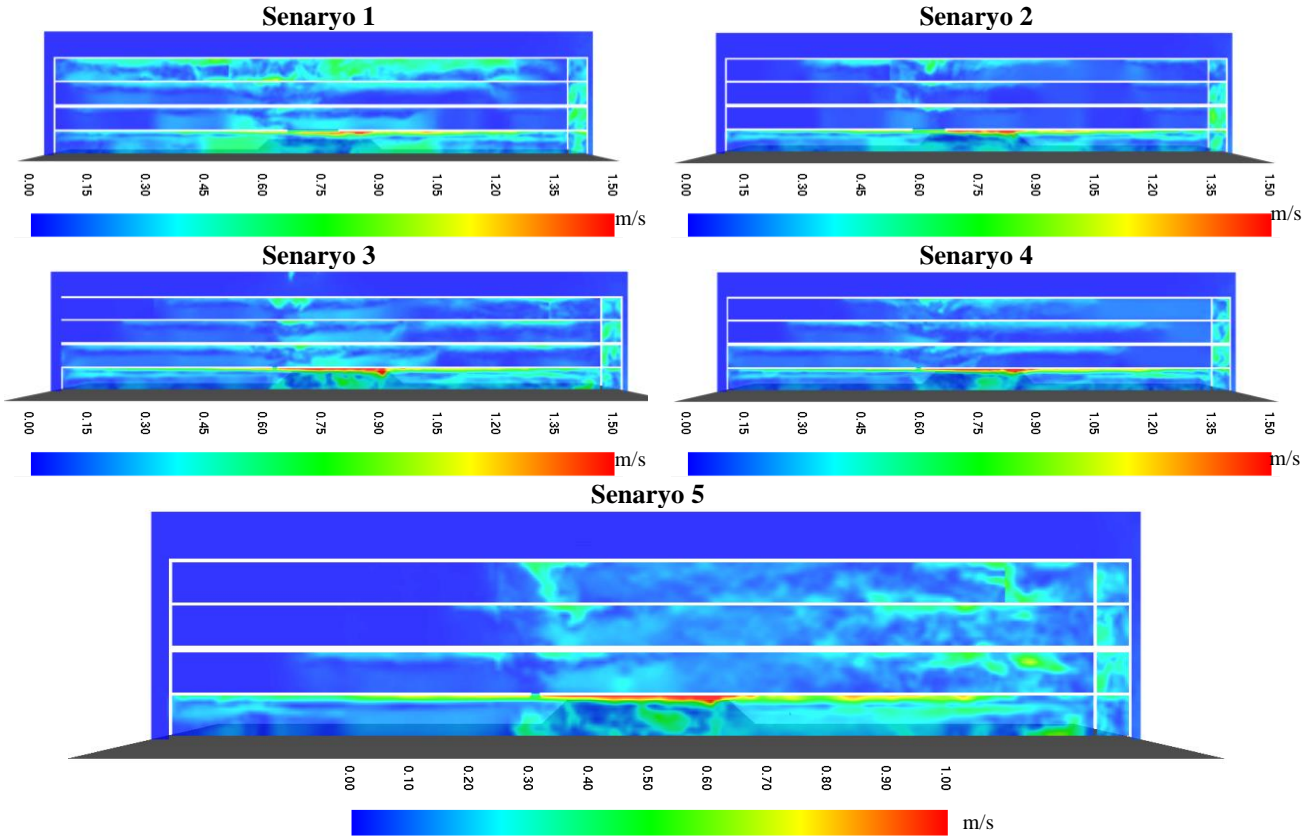
Fanlı senaryoda yangının çıktığı sunucu odasında vakum etkisinin olduğu düşünülmekte ve bu yüzden oda içerisindeki yetersiz havanın etkisiyle daha az dumanın oluştuğu varsayılmaktadır. Bu sebeple 2 boyutlu kesitin alındığı alandaki dumanın hızının 1 m/sn’yi geçmediği anlaşılmaktadır. Diğer senaryolarda ise duman hızı ise 1.5 m/sn olduğu simülasyon sonuçlarından anlaşılmaktadır.



Şekil 13. 100 saniye sonra bina içerisindeki gazların akış hızı dağılımı (Gas flow distribution in the building after 100 s.)

Şekil 14'de 300'üncü saniye için gazların hızlarının tüm katlarda belirgin oranda artış gösterdiği anlaşılmaktadır. En düşük hava hızı dağılımının ise pencerelerin tek kanatlarının açık olduğu durumda ortaya çıktığı anlaşılmaktadır.

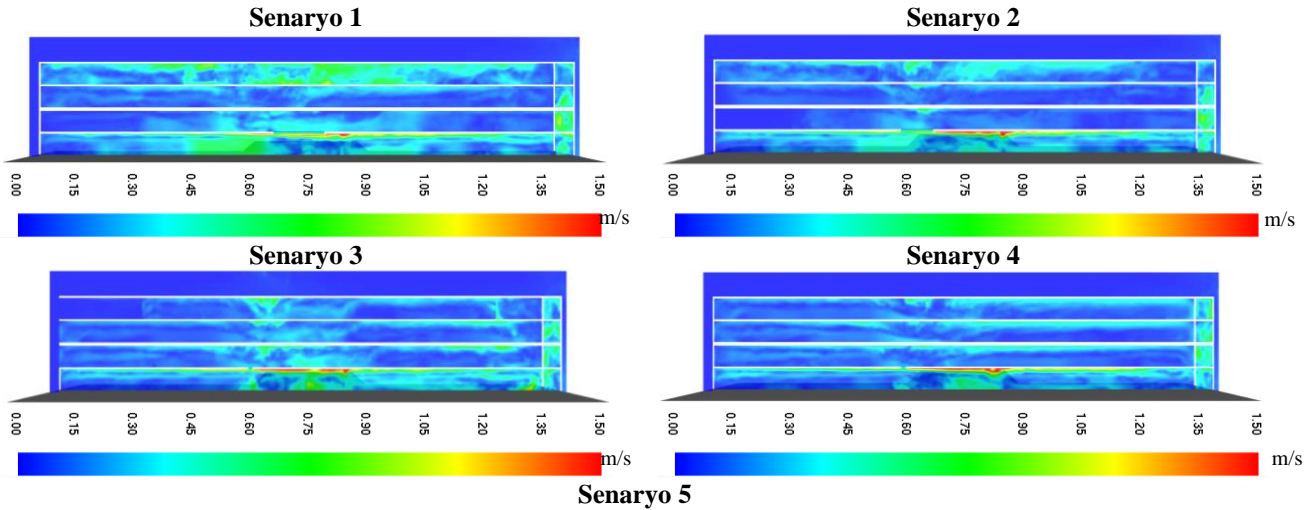
Fanlı senaryoda yangın merdiveni çıkış kapıları ile fan arasında kalan alanda hava hızının belirgin şekilde fazla olduğu görülmektedir.

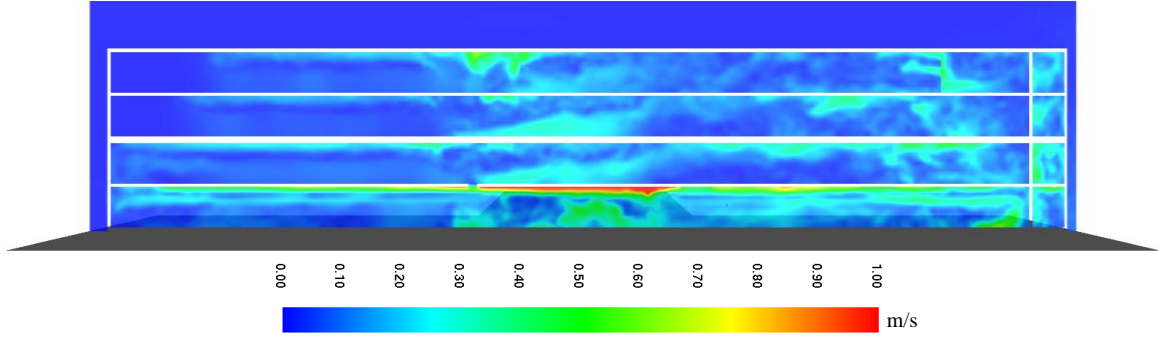


Şekil 14. 300 saniye sonra bina içerisindeki gazların akış hızı dağılımı (Gas flow distribution in the building after 300 s.)

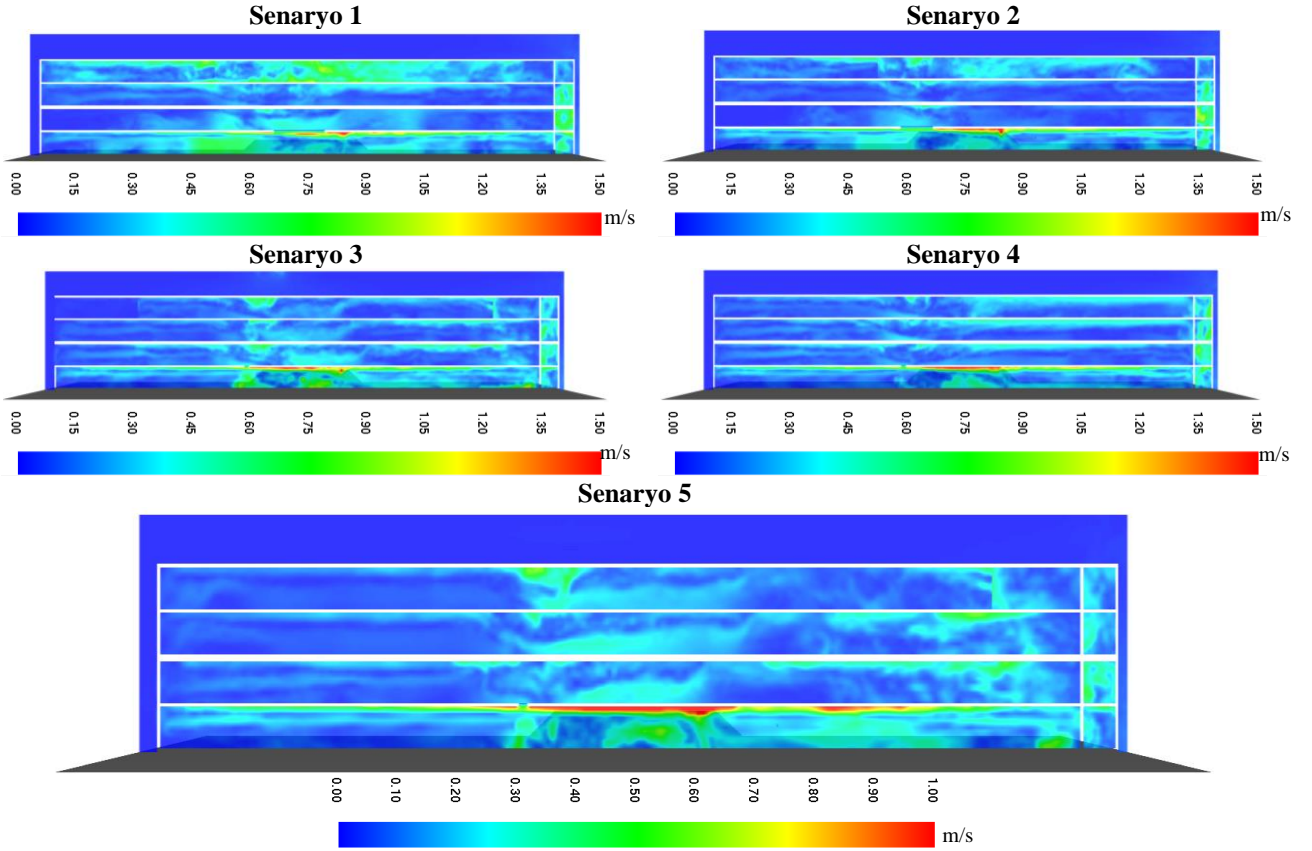
Şekil 15'de 500'üncü saniye için verilen bina içi hız dağılımlarından anlaşılacağı üzere duman tüm katlara yayıldıkça binada içi hava hızları

artmaktadır. Pencerelerin tam açık olduğu durumda en üst katta hava hızlarının diğer katlara göre daha hızlı olduğu dikkat çekmektedir.





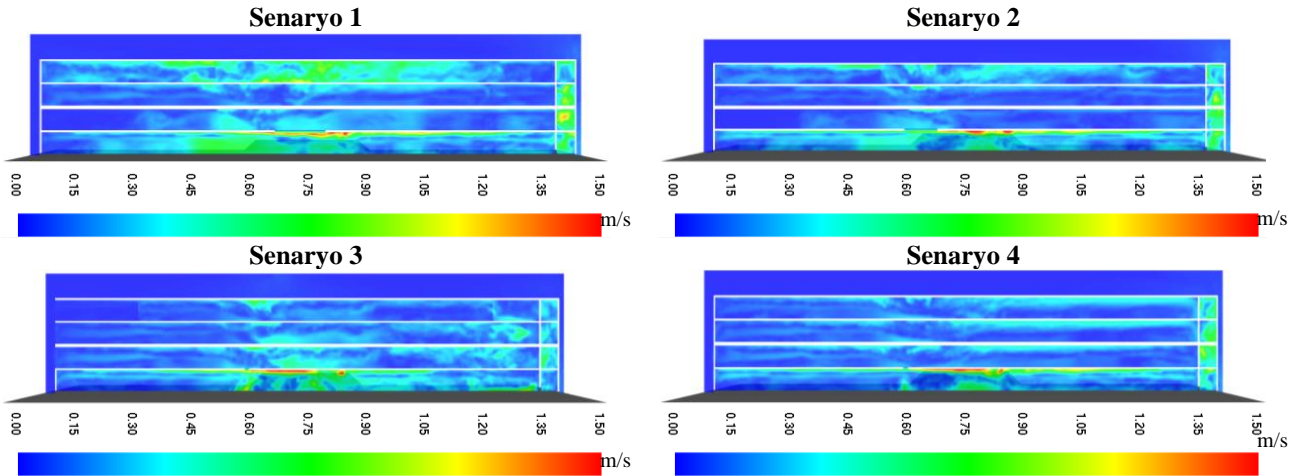
Şekil 15. 500 saniye sonra bina içerisindeki gazların akış hızı dağılımı (Gas flow distribution in the building after 500 s.)



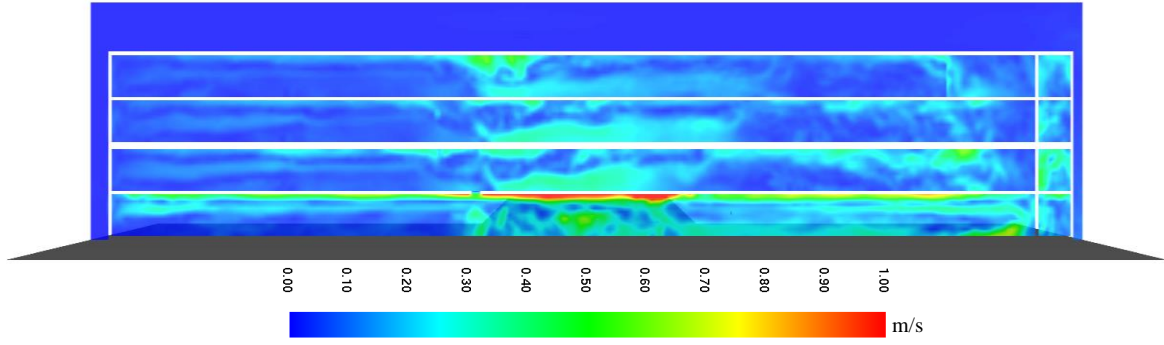
Şekil 16. 700 saniye sonra bina içerisindeki gazların akış hızı dağılımı (Gas flow distribution in the building after 700 s.)

Şekil 16' de 700'üncü saniye için pencerelerin yarı ve tam açık olduğu durumlarda zemin ve en üst katlarda ortalama gaz hızlarının yaklaşık olarak

1,5 m/sn'ye yükseldiği görülmektedir. Diğer durumlarda ise sadece yangının çıktığı bölgede yüksek hızlı gaz akışı olduğu anlaşılmaktadır.



Senaryo 5

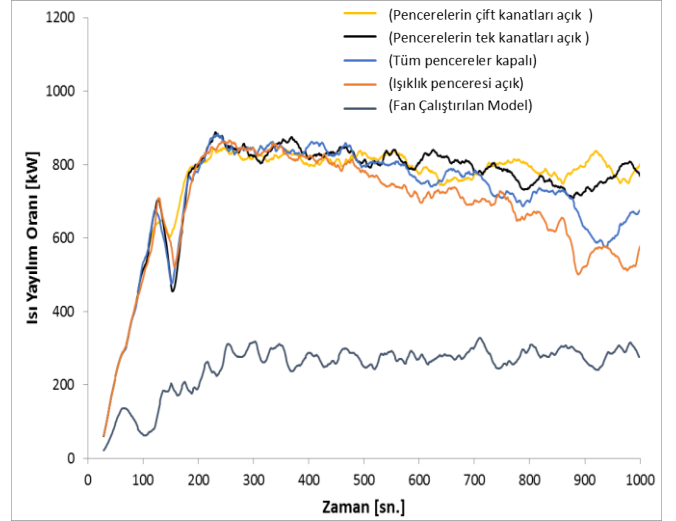


Şekil 17. 1000 saniye sonra bina içerisindeki gazların akış hızı dağılımı (Gas flow distribution in the building after 1000 s.)

Şekil 17’de yangının 1000. saniyesinde bina içerisindeki gaz hızlarının son hali görülmektedir. Tüm senaryolar için hız dağılımları bina içi hava akışının durumuna göre şekillenmiştir. Bu bölgelerde duman hareketlerinin yoğun olduğu ve yangına müdahale aşamasında hava hızlarının düşük olduğu yerlerden ilerlemeni çok daha etkin ve hızlı müdahaleye imkân vereceği düşünülmektedir.

3.3. Farklı Senaryolar İçin Isı Yayılım Oranı Grafikleri (Heat Release Rate Graphic for Different Scenarios)

Şekil 18’de dört farklı senaryo için zamana bağlı olarak ısı yayılım oranı değerleri verilmiştir. 850 kW enerji ile 60 saniye boyunca artarak başlaması planlanan yangının fan çalıştırılan model dışında oda içerisindeki tanımlanan malzemelerin tutuşma anına kadar (yaklaşık 120 saniye) hızla yükseldiği daha sonra bir miktar düşüp yanmaya başlayan malzemeler ile yaklaşık 900 kW kadar yükseldiği görülmektedir. Yangının oda dışında başka bir yere sıçramadığı ve 300. saniyeden sonra azalmaya başladığı anlaşılmaktadır. Fakat bu durumun fanlı çalışma için farklılık gösterdiği anlaşılmaktadır. Bunun nedeni ana şalter odasında yangının büyümeye fırsat bulamadığı, oda içerisindeki havanın vakum etkisiyle taze hava ile sirkülasyon fırsatı bulamadığı ve yangının bir miktar boğulduğu anlaşılmaktadır. Bu yüzden yangın ile oluşan ısı yayılımının en yüksek 350 kW değerine kadar ulaştığı ve 1000 saniye boyunca bu seviyelerde sabitlendiği anlaşılmaktadır. Simülasyon süresi daha uzun olsaydı ilerleyen saniyelerde yanan malzeme tükendikçe ısı yayılım oranının azalacağı beklenmektedir.



Şekil 18. Bina İçerisindeki Isı Yayılım Oranı Grafikleri (Heat Release Rate Graphics in the Building)

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (RESULT AND CONCLUSIONS)

Bu çalışmada bina pencerelerinin açık ve kapalı olması ve binada duman tahliye fanının çalıştırılması durumlarına göre tasarlanan beş farklı senaryo için yangın simülasyonları yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar ile yangın dumanının bina içerisindeki dağılımı, gaz hızları ve ısı yayılım oranları farklı senaryolara göre elde edilerek sonuçlar incelenmiştir. Elde edilen verilere göre sonuçlar maddeler halinde sıralanırsa;



- Yapılan analiz sonuçları için, fiziki olarak mevcut olmayıp senaryo gereği eklenen duman tahliye fanının çalıştırıldığı simülasyonda bina içerisindeki dumanın dağılımı diğer senaryolara göre gözle görülür biçimde daha azdır. Elde edilen veriler ışığında binaya eklenecek ve yangın anında aktif hale getirilecek bir duman tahliye fanının ciddi miktarda duman tahliyesi sağlayabileceğini anlaşılmaktadır. Böylece duman zehirlenmesinden kaynaklanan olası can kayıpları ihtimalini diğer senaryolara göre daha aza indirmek anlamına

gelmektedir. Ayrıca yangına müdahale eden sorumlu personel ve itfaiye ekiplerine daha rahat müdahale imkânı da sağlanabilecektir.

- Pencerelerin çift kanatlarının açık olduğu durumlarda dumanın bina içerisine çok daha hızlı bir şekilde yayıldığı anlaşılmıştır.
- Yangın merdivenine giden koridor ekseninde bina içerisindeki gaz hızlarının pencerelerin tek kanatlarının açık ve tüm pencerelerin kapalı olduğu senaryolarda diğer senaryolara göre daha az olduğu görülmüştür.
- Yapılan analizler sonucu, çıkabilecek bir yangında en etkili duman tahliyesinin ışıklık bölgesine duman tahliye fanının çalıştırılması ile gerçekleştirilebileceği anlaşılmaktadır.
- Simülasyonlar sırasında yangın merdivenlerinde duman birikimi gözlemlenmiştir. Bina tahliyesi sırasında yangın merdivenlerinde yoğun bir dumanın olması istenmeyen bir durum olacaktır. Yangın merdivenlerinin yan duvarlarına ek havalandırma pencerelerinin açılmasıyla daha iyi bir havalandırma sağlanabilir veya havalandırma pencerelerini tamamen kapatıp yine bir fan yardımıyla merdiven boşluğuna ters basınçla yaparak dumanın merdiven alanına girmesinin önlenmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] L. Fang, P. V. Nielsen, H. Brohus, "Investigation on smoke movement and smoke control for atrium in green and sustainable buildings", *Aalborg University, Department of Civil Engineering Technical Report No. 32*, 2007.
- [2] J. Jie, L. Kaiyuan, Z. Wei, H. Ran, "Experimental investigation on influence of smoke venting velocity and vent height on mechanical smoke exhaust efficiency", *Journal of Hazardous Materials*, Cilt 177, Sayı 1-3, pp. 209-215, 2010.
- [3] K. McGrattan, R McDermott, S. Hostikka, J. Floyd, "NIST Special Publication 1019 Fire Dynamics Simulator (Version 6.1.2) User's Guide", NIST, 2015.
- [4] W.K. Chow, "Application of Computational fluid dynamics in building services engineering", *Build. Environ.* Cilt 31, pp. 425-436, 1996)
- [5] G. W. Zou, W. K. Chow, "Evaluation of the Field Model, Fire Dynamics Simulator, for a Specific Experimental Scenario", *Journal of Fire Protection Engineering*, 15: 77, 2005.
- [6] L.H. Hua, N.K. Fong b, L.Z. Yang a, W.K. Chowb, Y.Z. Li a, R. Huoa, "Modeling fire-induced smoke spread and carbon monoxidetransportation in a long channel: Fire Dynamics Simulator comparisons with measured data", *Journal of Hazardous Materials*, cilt 140, pp. 293-298, 2007.
- [7] V.A. Oven, N. Cakici, "Modelling the evacuation of high-rise Office building in İstanbul", *Fire Safety Journal*, vol. 44, pp. 1-15, 2009.
- [8] T-S. Shen, Y-H. Huang, S.-W. Chien, "Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene", *Building and Environment*, vol. 43, pp. 1036-1045, 2008.
- [9] Z. Xu, X. Z. Lu, H. Guan, C. Chen, and A. Z. Ren, "A virtual reality based fire training simulator with smoke hazard assessment capacity," *Advances in Engineering Software*, vol. 68, pp. 1-8, 2014.
- [10] X.G. Zhanga, Y.C. Guoa, C.K. Chanb, W.Y. Lina, "Numerical simulations on fire spread and smoke movement in an underground car park", *Building and Environment*, cilt 42, pp. 3466-3475, 2007.
- [11] X. Zhang, X. Wang, Y. Zhou, "Numerical simulation study on bus fire", *International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering*, 2011.
- [12] <http://www.thunderheadeng.com/pyrosim/> (Erişim tarihi: 15.04.2017)
- [13] Seçilmiş Göstergelerle Sakarya 2013, Türkiye İstatistik Kurumu. Yayın No: 4218 ISSN: 1307-0894

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Gelis/Received</u> 10-02-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 12-09-2017		<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.291218

Sapanca Gölü çevresinde karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kirleticilerinin emisyon envanteri

Hülya Demirel^{*1}, Asude Ateş²

ÖZ

Endüstrileşmeye bağlı olarak hızlı nüfus artışı, yaşam kalitesinin iyileşmesi büyük şehirlerde taşıt sayısının her geçen gün artmasına neden olmaktadır. Konutlar ve endüstriyel tesislerden kaynaklanan hava kirliliğinin yanı sıra trafik kaynaklı hava kirliliği de önemli çevresel sorunlara yol açmaktadır. Bu nedenle, motorlu taşıtlardan kaynaklanan hava kirleticilerinin belirlenmesi başta insan sağlığı olmak üzere çevreye olan olumsuz etkilerinden dolayı önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında Sapanca Gölünü çevreleyen otoyollarda taşıt sayımlara yapılarak farklı araç türleri için saatlik trafik yoğunlukları belirlenmiştir. Trafik kaynaklı hava kirleticilerinin (PM, NO_x, CO, VOC) EMEP/EEA emisyon faktörleri kullanılarak emisyon envanterlenmesi yapılmış, Marmara bölgesi için önemli bir su kaynağı olan Sapanca gölüne etki edebilecek emisyon miktarları belirlenmiştir. Çalışmaya göre bir hafta boyunca atmosfere verilen toplam emisyon miktarları; PM için 2 ton, NO_x için 41 ton, CO için 84 ton ve VOC 14 ton için yaklaşık olarak bulunmuştur. Uzun vadeli sonuçlar değerlendirildiğinde Sapanca gölü ve besleyen dereler için motorlu taşıtların önemli bir kirletici kaynak olduğu ve önlemler alınması gerektiği kanısına varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sapanca gölü, motorlu taşıtlar, hava kirliliği, emisyon envanteri

Emission inventory of air pollutants from road traffic around Sapanca Lake

ABSTRACT

Rapid population growth and improvement in quality of life as a result of industrialization led to increase in the number of vehicles in big cities day by day. In addition to air pollution originating from households and industrial facilities, air pollution from traffic also causes serious environmental problems. Therefore, determination of air pollutants from motor vehicles is crucial because of their adverse effects to the environment, particularly to human health. Within the scope of this study, hourly traffic densities were identified for different vehicle types by carrying out vehicle counts on highways that surround Sapanca Lake. Using CORINAIR emission factors, an emission inventory was conducted for air pollutants originating from traffic (PM, NO_x, CO, VOC) and their impact on Sapanca lake, which is an important water supply for the Marmara region, was evaluated. Based on the study, the total amount of emissions released to the atmosphere throughout a week, was determined 2 ton, 41 ton, 84 ton and 14 ton for PM, NO_x, CO, and VOC, respectively. When long-term results were evaluated, it was deduced that motor

¹ Sakarya Üniversitesi Sakarya Meslek Yüksekokulu Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü hsemercioglu@sakarya.edu.tr

² Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü aates@sakarya.edu.tr

vehicles are an important source of pollution for Sapanca Lake and its influent streams, and that measures have to be taken.

Keywords: Sapanca lake, motor vehicles, air pollution, emission inventory

1. GIRIŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda hızlı nüfus artışı, kentleşme, doğal kaynakların bilinçsizce kullanımı, endüstrileşme ekolojik dengeyi bozmakta ve çevre kirliliği sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Motorlu taşıt sayısının her geçen gün artması büyük şehirlerde trafik yoğunluğu sorununu ortaya çıkardığı gibi trafik kaynaklı hava kirliliği insan sağlığını tehdit edecek seviyelere ulaşmıştır. Hava kirliliği, canlıların sağlığını olumsuz yönde etkileyen ve havadaki yabancı maddelerin, normalin üzerinde miktar ve yoğunluğa ulaşması, havanın doğal bileşiminin bozulmasıdır. Özellikle trafik ve ısınma amaçlı kullanılan fosil yakıtlar ve yanma ürünleri hava kirliliğine ve buna bağlı olarak su ve toprak kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir.

Motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticiler, atmosferde gaz veya partikül halinde pek çok farklı bileşiği içerir [1,2,3]. Motorlu taşıtlardan kaynaklanan kirleticilerin başında partikül madde (PM), azot oksitler (NO_x), karbon monoksit (CO) ve hidrokarbonlar (HC) ve uçucu organik bileşikler gelmektedir [4]. Bu kirleticilerin dışında taşıtlardan kurşun (Pb), kadmiyum (Cd), nikel (Ni), bakır (Cu), krom (Cr), çinko (Zn) ve baryum [Ba] gibi ağır metaller atmosfere verilmektedir. Motorlu taşıtlardan kaynaklanan bu emisyonlar, trafiğin yoğun olduğu bölgelerde NO_x emisyonlarının %41'inden, CO emisyonlarının %44'ünden ve PM emisyonlarının %16,4'ünden sorumludur [5]. Bu emisyonların, kardiyovasküler ve solunum yolları rahatsızlığına, astıma, çocuklarda akciğer gelişiminde bozukluğa, bebek ölümlerine ve kanser gibi daha birçok rahatsızlığa neden olmaktadır [6,7,8]. Ayrıca, atmosfere salınan emisyonların karayollarına yakın bölgelerde yer alan içme suyu kaynaklarını ve toprak yapısını etkilediği yapılan literatür çalışmalarından bilinmektedir [9,10,11]. İnsanların maruz kaldığı emisyonların hava kalitesine etkisi ve bu emisyonların miktarlarını belirleyebilmek için emisyonların envanterlenmesi oldukça önemlidir.

Portekiz'de VSP/EMEP metodu ile trafik kaynaklı emisyonlar tahmin edilerek bölgesel ölçekte hava kalitesi modeli oluşturulmuştur. Çalışmada günlük emisyon değerlerinin diğer bölgelere göre şehir merkezinde daha yüksek olduğu ve bu sırada ortalama trafik hızının 50 km/sa' ten az olduğu tespit edilmiştir [12].

İtalya'da yapılan çalışmada trafik kaynaklı emisyonların envanteri hazırlanmış ve COPERT III modeli kullanılmıştır. 2001 yılı için toplam CO, NMVOC, PM ve NO_x emisyonları 79,520ton, 11,547ton, 1867ton ve 19,380ton olarak bulunmuştur [13]. Güney İtalya bölgesinde yapılan diğer bir çalışmada trafik kaynaklı değerlendirmede kullanılan COPERT modeli ile CO, VOC, PM₁₀, NO_x ve bazı ağır metallerin envanteri oluşturulmuştur [14]. İsveç'te yapılan çalışmada COPERT III modeli yardımıyla trafik kaynaklı NO_x konsantrasyonu ve buna paralel olarak ağır metal emisyonları incelenmiştir [15]. Çin'de yapılan çalışmada ise 2004-2030 yıllarını kapsayan taşıt tipi ve yakıt tüketimine bağlı iki farklı metot ile emisyon envanteri oluşturulmuştur. 2030'a kadar CO, VOC, NO_x ve PM₁₀ emisyon değerlerinin sırasıyla %467.52, %61.44, %8.31 ve %78.35 oranında artacağı tahmin edilmiştir [16].

İzmir'de yapılan bir çalışmada şehir merkezinde yer alan önemli caddelerden 19'unda sayım yapılarak karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kirliliği incelenmiştir. Çalışmada taşıtlar sınıflandırılmış ve CORINAIR emisyon faktörleri kullanılarak kış ve yaz mevsiminde CO 108 ton, NO_x 48 ton, PM₁₀ 2 ton olarak bulunmuştur [17]. Üniversite yerleşkesinde ise bu değerler haftalık 54,1kg, 21,3kg ve 1kg olarak belirlenmiştir [18]. CO, CH₄, NMVOC, NO_x, PM₁₀ gibi hava kirleticilerinin derişimlerinin cadde ölçeğinde tahmin edilmesi amacıyla taşıt sayımları yapılarak yapay sinir ağı modelleri oluşturulmuş ve İzmir'in hava kalitesi yönetiminde kullanılacak bir model ortaya konmuştur [3].

Gaziantep'te trafik kaynaklı hava kalitesinin belirlenmesi için taşıt sayımları ve emisyon faktörleri yardımıyla emisyon miktarları hesaplanmış ve ilin kirlilik haritası oluşturulmuştur. Emisyon miktarları en yüksek

taşıt sayısının fazla olduğu şehir merkezi ve organize sanayi bölgesinde bulunmuştur [19].

Kocaeli’nde yapılan çalışmada ise ana yollarda taşıt sayımları yapılmış, COPERT III modeli ile PM emisyonu 199 ton- 155 ton- 150 ton ve NOx emisyonu 3860 ton- 4036 ton- 4029 ton olarak hesaplanmıştır. Emisyon miktarının en yüksek olduğu yolun otoyol olduğu belirlenmiştir [20]. Sakarya’da yapılan çalışmalarda ise şehir içinde taşıt sayımları yapılarak taşıtlar tiplerine göre sınıflandırılmış ve COPERT III emisyon faktörleri kullanılarak CO, PM, NOx ve HC emisyonları belirlenmiştir [21], [22]. CO, HC ve Pb emisyonlarının temel kaynağının otomobiller ve PM, NOx ve SO2 emisyonlarının ise ağır ticari taşıtlar olduğu belirlenmiştir. Sakarya’da belli caddelerde saatlik bazda emisyon envanteri oluşturulmuştur. Otomobiller için en yoğun saat 16:00 olup NOX 1636,1g/sa, CO 6454,6g/sa ve HC 326,2g/sa, otobüsler için saat 11:00’de NOx 574,8g/sa, CO 184,7g/sa ve PM 21,7g/sa olarak hesaplanmıştır. Kamyon ve hafif ticari taşıtlarda en yoğun saat 10:00 olup kamyonlarda NOx 55g/sa, CO 45,6g/sa, PM 6,13g/sa ve hafif ticari taşıtlarda ise sırasıyla 2239,8g/sa, 1033,9g/sa ve 206,4g/sa’tir.

Karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kirliliğini belirlemek için pek çok emisyon envanterlemesi, modelleme çalışmaları yapılmış ve ekolojiye olan etkileri değerlendirilmiştir.

E-80 TEM Anadolu otoyolu Türkiye’nin en yoğun otoyollarından biri olup Marmara Bölgesi için önemli bir içme suyu kaynağı olan Sapanca Gölü’nü çevrelemektedir. Bununla birlikte eski Ankara-İstanbul karayolu olan D-100 karayolu da Sapanca gölüne paralel bir yoldur. Bu iki önemli yoldan kaynaklanan hava kirleticilerini belirlemek ve içme suyu kaynağına etkilerini incelemek son yıllarda artan çevre kirlilikleri ve su sıkıntısı dikkate alındığında önem arz etmektedir. Bu nedenle, çalışmada Sapanca Gölü’nü çevreleyen yolların trafik yoğunluğunun belirlenmesi ve su kalitesini etkileyebilecek karayolu kaynaklı hava kirleticilerinin envanterlenmesi amaçlanmıştır.

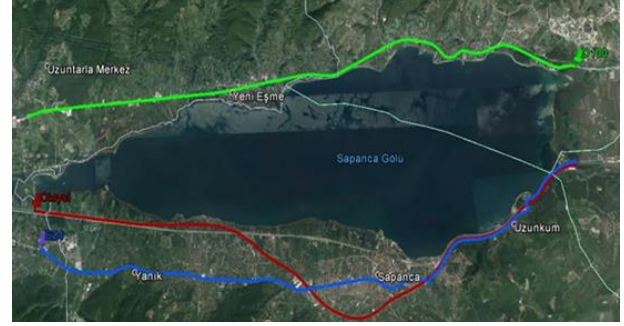
2. MATERİYAL-METOT (MATERIAL-METHOD)

2.1. Çalışma alanı (Study Area)

Bu çalışma Türkiye’nin en önemli otoyollarından biri olan E-80 Tem Anadolu Otoyolu ile D-100 karayolunu arasında kalan ve Sakarya il

sınırlarında bulunan Sapanca gölünün çevresinde oluşan trafik için gerçekleştirilmiştir. Marmara Bölgesi için yol uzunlukları ve taşıt sayısı dikkate alındığında günlük trafik yoğunluğunda en önemli yollardan birisidir [23]. Çalışma kapsamında Şekil 1’de görüldüğü gibi E-80 otoyolu ve D100 karayolunun Sapanca gölü çevresinde kalan bölgelerinde karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kirleticileri belirlenip emisyon envanteri çıkarılmıştır.

Emisyon envanteri oluşturulurken E-80 otoyoluna paralel olan Sapanca-İzmit yolu da hesaplamalarda dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Sapanca gölü ve yollar (Sapanca lake and roads)

2.2. Taşıt sayımı ve sınıflandırması (Vehicle count and classification)

Söz konusu yollar karayolu taşımacılığında büyük öneme sahiptir. Kamyon ve tırlar günün belli saatlerinde yola çıktıklarından, bu yollar gün boyunca trafik akışının yoğun olduğu yollardır. Bu nedenle güvenilir veriler elde edebilmek için taşıt sayımları 24 saatlik periyotlarla hem hafta içi hem de haftasonu manuel yapılmıştır. Taşıtların sınıflandırılması otomobil, hafif ticari (kamyonet ve minibüs), otobüs, kamyon ve motosiklet şeklinde yapılmıştır. Taşıtların motor teknolojisine ve yakıt tipine göre dağılımları ise TÜİK (Türkiye İstatistik Kurumu) verileri dikkate alınarak yapılmıştır [24].

2.3. Emisyon Envanteri (Emission inventory)

Motorlu taşıtlardan kaynaklanan PM, NOx, CO ve VOC emisyonları emisyon faktörleri kullanılarak hesaplanmıştır. Emisyon faktörleri, kullanılan yakıtın kütlesi başına veya taşıt aktivitesi başına oluşan kirleticiler miktarı olarak tanımlanır [20]. Taşıt aktivitesine bağlı emisyon miktarı formül (1)’de yer alan formül kullanılarak her bir taşıt sınıfı için taşıt kilometrelerine göre ayrı hesaplanırken yakıt tüketimine bağlı emisyon miktarları formül (2)’ye göre hesaplanmaktadır.

$$E = EF \times A \quad (1)$$

$$E = EF \times A \times FC \quad (2)$$

E; Emisyon miktarı (g)

EF; Emisyon faktörü (g/km)

A; Taşıt aktivitesi (km)

FC; Yakıt tüketimi (g-yakıt/km)

EF; Bulk emisyon faktörü (µg/kg-yakıt)

Taşıt aktivitesi yoldan geçen taşıt sayısı ile yol uzunluğunun bileşkesidir. D-100 ve E-80 yollarının Sapanca gölünü çevreleyen bölgelerinin uzunlukları Google Earth kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen taşıt aktivitesini formül (2)'de kullanarak emisyon miktarları hesaplanmıştır. Her bir taşıt sınıfı için bulk emisyon faktörleri ve kilometre başına yakıt tüketimleri "EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2013" kılavuzundan elde edilmiştir [25]. Kılavuzda emisyon faktörleri ve yakıt tüketimleri; taşıt tipi, motor teknolojisi (Euro sınıfı), yakıt türü ve taşıt hızı gibi parametrelere bağlı olarak geliştirilmiştir. Taşıtların motor teknolojileri yakıt tüketimlerini belirleyebilmek için önemli bir kriter olup bu bilgiye Karayolları Genel Müdürlüğü ve Türkiye İstatistik Kurumunun ortaklaşa hazırladığı raporlardan ulaşılmıştır. Emisyon envanterinde kullanılan emisyon faktörleri Tablo 1'de ve km başına yakıt tüketimleri Tablo 2'de verilmiştir. Emisyon envanterinde, otomobillerin %73'ünün benzinli, %27'sinin dizel, hafif ticari taşıtların ise %50'sinin benzinli, kamyon ve otobüslerin dizel ve motosikletlerin ise benzinli olduğu kabul edilmiştir [24].

Tablo 1. CORINAIR Emisyon Faktörleri (µg/kg-yakıt) (CORINAIR Emission Factors)

	CO	NO _x	VOC	PM
Benzinli otomobil	221.70	28.39	34.41	0
Dizel otomobil	12.66	11.68	3.73	4.95
Benzinli hafif ticari taşıt	305.63	26.58	32.61	0
Dizel hafif ticari taşıt	15.94	20.06	2.08	4.67
Otobüs	15.71	49.18	4.13	2.15
Motosiklet	691.76	4.82	114.71	0

Tablo 2. Km başına yakıt tüketim miktarları (g-yakıt/km) (Fuel consumption amount per km)

Otomobil	Hafif ticari	Otobüs	Kamyon	Motosiklet

Benzin pre-euro	77	85	-	-	37
Benzin Euro 1	66	100	-	-	-
Dizel pre-euro	63	89	366	182	-
Dizel Euro 1	55	90	-	-	-

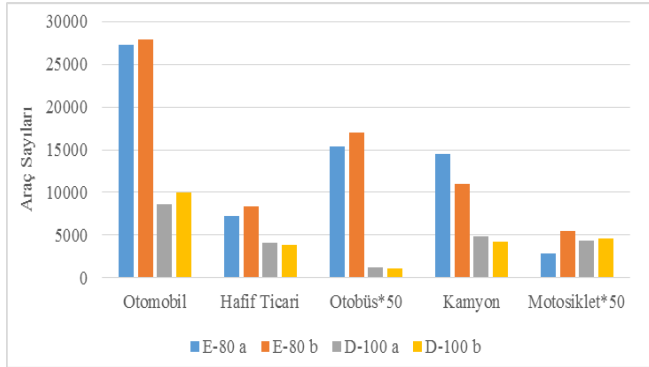
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Taşıt Sayımı (Vehicle Count)

İnsanların ulaşım ihtiyaçlarını ve beklentilerini karşılayabilmek için farklı teknolojileri sahip pek çok taşıt bulunmaktadır. Türkiye'de kullanılan taşıtlar çoğunlukla fosil yakıtlarla çalışmaktadır. NO_x, PM, CO, HC ve ağır metal gibi emisyonlar fosil yakıtların yanması sonucu oluşmaktadır. Ayrıca bu emisyonlar taşıtların motor teknolojisi ve yakıt tipine göre atmosfere salınmaktadır. Emisyon miktarları hem motor teknolojisi ile yakıt tüketimine hem de taşıt aktivitesine bağlıdır. Taşıt aktivitesi ekonomik ve sosyal durumuna göre değişmekte olup her bir taşıt tipi için aktiviteyi belirlemek kolay değildir. Bu çalışma kapsamında Sapanca gölü çevresinde yer alan karayollarında yapılan taşıt sayımlarına göre taşıt tipine bakılmaksızın taşıt yoğunluğu hem hafta içi hem de hafta sonunda en fazla E-80 TEM Anadolu otoyolunda olduğu görülmektedir. Şekil 2'de görüldüğü üzere taşıt sayımları hafta içi ve hafta sonu olmak üzere iki farklı şekilde gözlemlenmekte olup her iki karayolunda da taşıtların %50'sini otomobil oluşturmaktadır. Bununla birlikte seyir halinde bulunan otobüs ve motosiklet sayıları diğer taşıt tiplerine göre çok daha az olduğundan grafikte anlaşılabilmesi için bu taşıtlar gerçekten 50 kat fazla verilmiştir. E-80 otoyolunda hafta içi ve hafta sonu otomobil sayısı günlük 27300 ve 28000, otobüs sayısı 3060 ve 3400 ve kamyon sayısı ise 14520 ve 11000 olmaktadır. D-100 karayolunda ise bu değerlerin sırasıyla otomobil için 8680 ve 9980, otobüs için 250 ve 220 ve kamyon için 4800 ve 4300 olduğu belirlenmiştir. 24 saatlik taşıt sayımları sonucunda ortalama günlük toplam taşıt sayısı E-80 otoyolunda 51490 ve D-100 karayolunda ise 18205 değerindedir.

Taşıt sayımları saatlik incelendiğinde E-80 otoyolunda hafta sonu saat 08:00-16:00 arası saatte 2400-3200, hafta içi ise saat 09:00-18:00 arası saatte 1800-2900 civarında taşıtın seyir halinde olduğu görülmektedir. Otoyollarda taşıt aktivitesi kent merkezlerinden çok farklı bir trend izlemektedir. Bunun nedeni otoyolların karayolu taşımacılığında büyük bir öneme sahip olmasıdır. E-80 otoyolunda hafta sonu saat 22:00-08:00 arası saatte 1400-500, hafta içi ise aynı saatlerde saatte 1900-300 civarında taşıtın seyir halinde olduğu ve otoyollarda trafiğin sürekli devam ettiği görülmektedir.

D-100 karayolunda ise hafta sonu saat 08:00-16:00 arası saatte 790-1290, hafta içi ise saat 09:00-18:00 arası saatte 850-1290 civarında taşıtın seyir halinde olduğu görülmektedir. D-100 karayolunda hafta sonu saat 22:00-08:00 arası saatte 610-100, hafta içi ise aynı saatlerde saatte 600-150 civarında taşıtın seyir halinde olduğu ve otoyollarda trafiğin sürekli devam ettiği görülmektedir. E-80 otoyolunda hafta sonu en fazla taşıt sayısı saat 10:00-11:00 arası olurken, hafta içi 13:00-14:00 arasındadır. D-100 karayolunda ise hafta sonu en fazla taşıt sayısı saat 17:00-18:00 arası, hafta içi saat 18:00-19:00 arası olduğu gözlenmektedir. Bu saatlerdeki yoğunlaşmanın nedeni olarak otobüs ve kamyonların saat 16:00-22:00 arası İstanbul'dan köprülerden geçiş izinlerinin olmaması ve geçiş saatlerinin buna göre ayarlanması olarak yorumlanmıştır.



Şekil 2. E-80 ve D-100 karayolunda a)hafta içi, b)hafta sonu taşıt sayımları (a) weekday, b) weekend vehicle counts in E-80 and D-100 roads)

3.2. Emisyon Envanteri (Emission Inventory)

Emisyonlar yakıt tüketimine bağlı olarak meydana gelmektedir. Taşıt aktivitesi arttıkça, yakıt tüketimi de artmaktadır. Sonuç olarak yakıt tüketiminden kaynaklanan NOx, PM, CO, HC ve ağır metal gibi emisyonlar atmosfere salınmakta ve karayolu kaynaklı hava kirliliği meydana gelmektedir. Atmosfere salınan bu emisyonlar göl

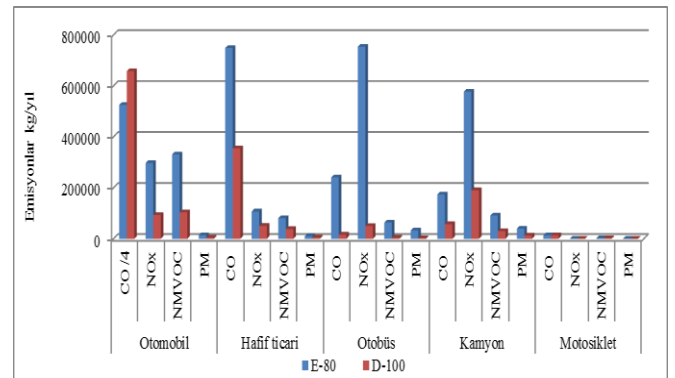
çevresinin yerleşim alanı ve turistik alan olması sebebiyle insanlara ulaşmadan önce zararsız konsantrasyon seviyesinde olacak şekilde seyreltilmesi için yeterli zaman bulunmamaktadır.

Taşıt emisyonlarının insan sağlığına ve hava kalitesine etkilerinin belirlenebilmesi için şehirlerde hava kirliliği ölçüm istasyonları bulunmaktadır. Fakat istasyonlarda ölçülen emisyon konsantrasyonları tüm şehrin yada herhangi bir bölgenin kirleticiliğini temsil edememektedir.

Bu nedenle, güvenilir veriler elde edebilmek için zamana bağlı konsantrasyonların değişimi ile ilgili hava kalite modelleme çalışmaları yapılmaktadır [22]. Yapılan emisyon envanteri sonucunda Şekil 3'te görüldüğü gibi E-80 ve D-100 karayolunda en fazla emisyon otomobillerden kaynaklanmaktadır.

E-80 otoyolunda otomobillerden kaynaklanan CO, NOx, NMVOC ve PM emisyonları 2076054kg/yıl, 297700kg/yıl, 331180kg/yıl ve 14074kg/yıl ve D-100 karayolunda ise sırasıyla 657635kg/yıl, 93166kg/yıl, 103462kg/yıl ve 4405kg/yıl olarak bulunmuştur. E-80 otoyolunda D-100 karayoluna göre seyir halinde bulunan taşıt sayısı daha fazladır.

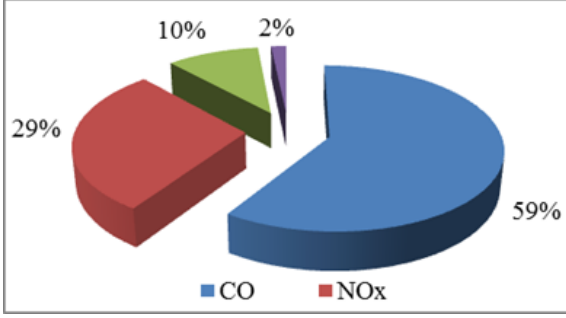
Şekil 3'ten de anlaşılacağı üzere E-80 otoyolundan kaynaklanan emisyon miktarları oldukça fazladır. Otobüs ve kamyonlar yapılan emisyon envanterinde dizel motorlu taşıt olarak kabul edildiğinden NOx emisyonları büyük oranda bu taşıtlardan kaynaklanmaktadır. Otobüs ve kamyonlardan kaynaklanan NOx emisyonları E-80 ve D-100 karayolunda sırasıyla 753652kg/yıl, 50375kg/yıl ve 577594kg/yıl, 190474kg/yıl olarak hesaplanmıştır. E-80 otoyolunda hafif ticari taşıtlardan kaynaklanan CO, NOx, NMVOC ve PM emisyonları 748666kg/yıl, 107259kg/yıl, 80737kg/yıl ve 10541kg/yıl ve D-100 karayolunda 354662kg/yıl, 50804kg/yıl, 38247kg/yıl ve 4992kg/yıl değerindedir.



Şekil 3.E-80 ve D-100 karayollarında oluşan yıllık emisyon

miktarları (kg/yıl) (Annual emission amounts in E-80 and
D-100 roads)

Şekil 4'te görüldüğü üzere, Sapanca gölü çevresinde oluşan emisyonların %59'u CO, %29'u NO_x, %10'u NMVOC ve %2'si PM olarak belirlenmiştir. CO emisyonunun diğer emisyonlara göre daha fazla oluşmasının sebebi yakıt tüketimine bağlı olarak oluşumunun daha yüksek olmasıdır.



Şekil 4. Sapanca Gölü çevresinde oluşan emisyonların dağılımları (Distribution of emissions occurring around Sapanca lake)

Tablo 3a, 3b, 3c ve 3d'de hafta içi ve hafta sonu taşıt tipine göre günlük emisyon miktarları verilmiştir. Buna göre oluşan emisyonlar incelendiğinde E-80 otoyolunda hafta sonu otomobil, hafif ticari, otobüs ve motosikletlerden kaynaklanan emisyon miktarı hafta içine göre daha yüksektir. Bunun sebebi ise hafta sonu seyahatlerin artması ve taşıt yoğunluğunun artış göstermesidir.

E-80 otoyolunda hafta sonu otomobil kaynaklı CO, NO_x, NMVOC ve PM emisyonları 5827kg/gün, 825kg/gün, 918kg/gün ve 39kg/gün olup hafif ticari taşıtlar için 2210kg/gün, 317kg/gün, 238kg/gün ve 31 kg/gün değerindedir. Kamyonların oluşturduğu yakıt tüketimi ve emisyonlar hafta içi daha yüksektir. D-100 karayolunda ise hafta sonu otomobil kaynaklı emisyonlar yüksek olup; diğer taşıt tiplerinde ise hafta içi yüksektir.

Yerleşim alanlarına yakın karayollarında oluşan emisyonların insanlara ulaşmadan önce zararsız konsantrasyon seviyesinde olacak şekilde seyrelmesi için yeterli zaman ve alan bulunmamaktadır [7, 8]. Sapanca gölü etrafındaki yerleşim alanlarının ve su kaynaklarının D-100 ile E-80 yollarına çok yakın olması nedeniyle insanlar bu karayollarında oluşan emisyonlar topografik ve meteorolojik özelliklerin etkisi ile yeterli seviyede seyrelme olmadan doğrudan maruz kalmaktadır. Bunun yanında havzadaki bitkiler ve Sakarya için içme suyu kaynağı olan Sapanca gölü ve gölü

besleyen dereler de bu emisyonlardan etkilenmektedir. Gün geçtikçe nüfus artışı ve refah düzeyi yükseldikçe taşıt sayısı artmakta ve bun bağlı olarak oluşan hava kirliliği ciddi boyutlara ulaşmaktadır.

Taşıtlarla ilgili emisyon azaltıcı tedbirler alınmadığı takdirde, hava kirleticileri doğal kaynakları ve insan yaşamını tehdit etmeye devam edecektir.

Tablo 3a. Hafta içi ve hafta sonu taşıt tipine göre emisyon miktarları (kg/gün) a)hafta içi, b)hafta sonu taşıt sayımları (Weekday and weekend vehicle type according to emission amounts a)weekday b)weekend vehicle counts)

	Otomobil			
	CO	NO _x	NMVOC	PM
E-80 a	5688	806	896	38
E-80 b	5827	825	918	39
D-100 a	1676	237	264	11
D-100 b	1927	273	304	13

Tablo 3b.Hafta içi ve hafta sonu taşıt tipine göre emisyon miktarları (kg/gün) a)hafta içi, b)hafta sonu taşıt sayımları (Weekday and weekend vehicle type according to emission amounts a)weekday b)weekend vehicle counts)

	Hafif Ticari			
	CO	NO _x	NMVOC	PM
E-80 a	1892	271	204	27
E-80 b	2210	317	238	31
D-100 a	998	143	108	14
D-100 b	946	135	102	13

Tablo 3c.Hafta içi ve hafta sonu taşıt tipine göre emisyon miktarları (kg/gün) a)hafta içi, b)hafta sonu taşıt sayımları (Weekday and weekend vehicle type according to emission amounts a)weekday b)weekend vehicle counts)

	Otobüs			
	CO	NO _x	NMVOC	PM
E-80 a	312	977	82	43
E-80 b	347	1087	91	48
D-100 a	23	73	6	3
D-100 b	21	65	5	3

Tablo 3d. Hafta içi ve hafta sonu taşıt tipine göre emisyon miktarları (kg/gün) a)hafta içi, b)hafta sonu taşıt sayımları (Weekday and weekend vehicle type according to emission amounts a)weekday b)weekend vehicle counts)

	Kamyon			Motosiklet		
	CO	NO _x	NMVO C	P M	C O	NMVO C
E-80 a	54 2	180 2	284	12 4	26	4
E-80 b	41 0	136 3	215	94	49	8
D-100 a	16 6	552	87	38	37	6
D-100 b	14 8	492	78	34	39	6

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yukarıda elde edilen veriler ve yapılan çalışmalar sonucunda Sapanca gölüne etki eden hava kirleticilerinin emisyon envanteri oluşturulmaya çalışılmıştır. Çalışmada kullanılan emisyon faktörleri EMEP/EEA emisyon faktörleridir. Ancak Türkiye bazında oluşturulmuş emisyon faktörleri olmaması ülkemiz için gerçek emisyon envanterlerinin oluşturulmasını güçleştirmektedir. Hava kirleticilerinin belirlenmesi için oluşturulan emisyon envanterlerinin yanı sıra aktif ve pasif örneklemelerle o bölgenin gerçek kirlilik yüklerinin belirlenmesi esas olmalıdır.

Çevresel kirlilik açısından hassas olan bölgelerde (Sapanca Gölü gibi) örneklemelerin arttırılması ve yorumlanması büyük önem taşımaktadır. Çalışmada ulaşılmak istenen çevresel risk faktörü yüksek olan yerlerde oluşan kirlilik faktörünün kaynaklarıyla net olarak ortaya konulmasıdır. Buna bağlı olarak Sapanca gölü çevresindeki karayollarının göl etrafında oluşturduğu toplam emisyon yükleri CO emisyonu için 4353 ton/yıl, NO_x emisyonu için 2121ton/yıl, NMVOC 747ton/yıl ve PM emisyonu için 122ton/yıl değerindedir. Sakarya’da yapılan önceki çalışmalar da saatlik bazda emisyon envanteri oluşturulmuş ve yıl bazında baktığımızda karayolundan kaynaklanan CO emisyonu yaklaşık 77 ton/yıl ve NO_x 0,4ton/yıl olarak bulunmuştur. Bu veriler çalışmada elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında; Sapanca gölü çevresinde emisyon miktarlarının çok yüksek olmasının sebebi ülkemizin en önemli otoyollarından E-80 Anadolu TEM otoyolunun Türkiye’deki pek çok araç tarafından kullanılıyor olmasıdır. Özellikle bayramlarda ve haftasonlarında otoyoldaki trafik

artış göstermekte ve dolayısıyla yakıt tüketimine bağlı olarak ortaya çıkan hava kirleticileri önemli seviyede artmaktadır.

Gün geçtikçe artan refah seviyesi ve nüfus artışı sonucunda taşıt sayısının arttığı göz önünde bulundurulduğunda özellikle hassas bölgeler başta olmak üzere şehir merkezlerinde hava kirliliğini azaltabilmek için önlemlerin alınması gerekmektedir. Alınabilecek önlemler olarak taşıtların düzenli bakımının ve denetiminin yapılması, yeşil alanların artırılması, kirlitenden çok daha fazla vergi alınması, kirliliğin yoğun olduğu yerlerde hız sınırlamalarının getirilmesi ve tüketicileri çevre dostu taşıtlara yönlendirme, taşıtlarını değiştirmeleri için teşviklerde bulunma sıralanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)



- [1] A. Sjodin, M. Lenner, “On-road measurements of single vehicle pollutant emissions, speed and acceleration for large fleets of vehicles in different traffic environments”, Science of the Total Environment, no.169, p. 157–165, 1995.
- [2] K. Nikolaou, S. Basbas, G. Toskas, “Air pollutant emissions and concentrations based on urban traffic modeling”, Fresenius Environmental Bulletin, no. 11, p. 494–498, 2002.
- [3] D. Baytak, S.C. Sofuoğlu, O. Alkan, T. Elbir, “Karayolu trafiğinden kaynaklanan kirlitici seviyelerinin yapay sınır ağları ile tahmin edilmesi”, Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi, no. 2, p. 28-35, 2013.
- [4] European Topic Centre on Air and Climate Change ETC/ACC. “Air emissions spreadsheet for indicators 2004”. Copenhagen, Denmark, 2005.
- [5] European Environment Agency EEA. (2007). “EMEP/CORINAIR Emission inventory guidebook 2006”. [online]. Available: <http://www.eea.europa.eu/publications/EMEP/CORINAIR4>. [Accessed: 25-Şubat-2015].
- [6] World Health Organization WHO. (2016, Apr.). “Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone and nitrogen dioxide-Report on a WHO Working Group”.

- [online]. Available: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf [Accessed: 25-Şubat-2016].
- [7] World Health Organization WHO. "Air quality guidelines for Europe; second edition" Copenhagen. Denmark, European series; No 91, 2005.
- [8] World Health Organization WHO. (2016, Apr.). "Health effects of transport-related air pollution". [online]. Available: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/74715/E86650.pdf. [Accessed: 8-Mayıs-2016]
- [9] İ. Şişman, "Sapanca bölgesinde Tem otoyolundan kaynaklanan ağır metal kirliliği", Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 1999.
- [10] B. Onat, Ü. Ş. Alver, A. Erol, M. Bacacı, V. Şahin, "İstanbul'da otoyol kenarında PM10, PM2.5 ve PM1'in toplam ve suda çözünen metal içeriklerinin belirlenmesi", IV. Ulusal Hava Kirliliği ve Kontrolü Sempozyumu, Ankara, Türkiye, 25-27 Ekim 2010.
- [11] M. Fallahshorshani, M. Andre, C. Bonhomme, C. Seigneur, "Coupling traffic, pollutant emission, air and water quality models: technical review and perspectives", *Procedia Social and Behavioral Sciences*, no. 48, p. 1794 – 1804, 2012.
- [12] C. Borrego, J. H. Amorim, O. Tchepel, D. Dias, S. Rafael, E. Sa, C. Pimentel, T. Fontes, P. Fernandes, S.R. Pereira, J.M. Banderia, M.C. Coelho, "Urban scale air quality modelling using detailed traffic emissions estimates", *Atmospheric Environment*, no. 131, p. 341-351, 2016.
- [13] R. Bellasio, R. Bianconi, G. Corda, P. Cucca, "Emission inventory for the road transport sector in Sardinia (Italy)", *Atmospheric Environment*, no. 41, p. 677–691, 2007.
- [14] P. Iodice, P. Adamo, F. Capozzi, A. Di Palma, A. Senatore, V. Spagnuolo, S. Giordano, "Air pollution monitoring using emission inventories combined with the moss bag approach", *Science of Total Environment*, no. 541, p. 1410-1419, 2016.
- [15] C. Johansson, M. Norman, L. Burman, "Road traffic emission factors for heavy metals", *Atmospheric Environment*, no. 43, p. 4681– 4688, 2009.
- [16] Q. Zhanga, J. Xua, G. Wang, W. Tiana, W. Jiangb. "Vehicle emission inventories projection based on dynamic emission factors: a case study of Hangzhou, China", *Atmospheric Environment*, no. 42, p. 4989–5002, 2008.
- [17] T. Elbir, A. Bayram, M. Kara, H. Altıok, R. Seyfioğlu, P. Ergün, S. Şimşir, "İzmir kent merkezinde karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kirliliğinin incelenmesi", *DEÜ Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, no. 12, p. 1-17, 2010.
- [18] T. Elbir, H. Koca, "Bir üniversite yerleşkesi içinde karayolu trafiğinden kaynaklanan hava kalitesinin belirlenmesi", *Hava Kirliliği Araştırmaları Dergisi*, no. 2, p. 45 – 54, 2013.
- [19] Y. Cuci, E. Polat Ergün, "Gaziantep'in trafik kaynaklı hava kirliliğinin belirlenmesi", *KSU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, no. 18-2, 2015.
- [20] S. Çetin, A. Karademir, B. Pekey, S. Ayberk, "Kocaeli ilinde trafik kaynaklı hava kirliticilerinin emisyon envanteri", *Kocaeli Özelinde Büyükşehirlerin Kentsel Yapılaşma ve Ulaşım Sorunları Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 28-30 Haziran 2006.
- [21] S. Soylu, "Estimation of turkish road transport emissions", *Energy Policy*, no. 35, p. 4088-4094, 2007.
- [22] S. Soylu, M. Gümrükçüoğlu, A. Bal, G. Şentürk, B. Aydınlar, "Examination of urban transport characteristics and its emissions - adapazarı case study", *ETTAP-09 17th Transport and Air Pollution Symposium - 3rd Environment and Transport Symposium*, Toulouse, France, 2-4 June 2009.
- [23] Karayolları Genel Müdürlüğü (2015). "2014 Trafik ve Ulaşım Bilgileri" [online] Available: <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Istatistikler/TrafikveUlasim.aspx>. [Accessed: 27-Nisan-2015]
- [24] Türkiye İstatistik Kurumu (Ağustos 2014). "Motorlu Kara Taşıtları İstatistikleri 2013", 4173, Ankara, Türkiye. [online] Available:

www.tuik.gov.tr/Kitap.do?metod=KitapDetay&KT_ID=15&KITAP_ID=72.
[Accessed: 7-Aralık-2014]

guidebook”. [online] Available:
https://www.google.com.tr/?gws_rd=ssl#q=Exhaust+emissions+from+road+transport.
[Accessed:13-Şubat-2011]

- [25] Ntziachristos, L, Samaras, Z. (2009).
“EMEP EPA emission inventory

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 17-02-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 12-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.292664	

Ar-Ge kuruluşunda kimyasal maddelerin sınıflandırılması, etiketlenmesi, ambalajlanması, depolanması, taşınması ve oluşan kimyasal atıkların bertarafı

Asude Ateş¹, Bayise Kavaklı Vatansever*²

ÖZ

Kimyasallar sadece kimyasal maddelerle çalışanlar için değil temas eden, kullanan her canlı için risk oluşturmaktadır. Kimyasallar başta soluduğumuz hava olmak üzere gıdaların, içme ve kullanma sularının, havanın kirlenmesine, doğal ortamın tahribata uğramasına ve ekosistemin değişmesine, çevre ve sağlığın olumsuz etkilenmesine neden olurlar. Kimyasal maddelerin olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılmasının veya azaltılmasının en etkili yöntemi kimyasal maddelerden kaynaklanan risklerin bilinmesi, analiz edilerek risklerin önlenmesine yönelik önlemlerin alınmasıdır. Risklerin önlenmesinde kimyasal maddelerin ve atıklarının sınıflandırılması, etiketlenmesi, ambalajlanması, depolanması, taşınması, kullanılması ve bertarafının belirlenmiş kurallara ve yasal mevzuata uygun yapılması büyük önem taşımaktadır. Bu makalede Ar-Ge kuruluşunda kimyasal maddelerin ve atıklarının sınıflandırılması, etiketlenmesi, ambalajlanması, kimyasal malzeme depolarının özellikleri, depolama kuralları, kimyasalların taşınması kuralları, kimyasal atıkların bertarafında uyulması gereken kurallar ve yasal mevzuat incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kimyasal madde, etiketleme, depolama, ambalajlama, bertaraf

Classification, labeling, packaging, storage, transportation of chemicals and disposal of chemical wastes in the establishment in R& D

ABSTRACT

Chemicals are not a risk for only chemical workers but also for all living beings that come into contact with it. The chemicals cause the pollution of air, food, drinking and using water needed, damage to the natural environment and change of ecosystem, environment and health negatively. The most effective method of eliminating or reducing the negative effects of chemical substances is to know the risks arising from the chemical substances and to analyze and prevent the risks. It is of great importance to classify, label, pack, store, transport, use and dispose of chemical substances and wastes in accordance with the determined rules and regulations in the prevention of risks. In this article, the classification of chemical substances and wastes, labeling, packaging, the characteristics of chemical material storage, the rules of storage and transportation of chemicals. The rules and legislation for the disposal of chemical wastes in the R & D organization was examined.

Keywords: Chemical substance, labeling, storage, packaging, disposal

¹ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sakarya- aates@sakarya.edu.tr

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

² TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsü, Kocaeli- bayise.kavakli@tubitak.gov.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kimya endüstrisi, doğada bulunan kimyasal maddeleri endüstri ve günlük yaşamda kullanılmak üzere saf hale getiren, yapı ve özelliklerini değiştiren, yeni kimyasal maddeler oluşturan sektördür. Kimyasal maddelerin kimyasal yapıları da dahil olmak üzere özelliklerini ve yapılarını değiştirerek endüstri alanında ve günlük yaşamda kullanılmak üzere yeni maddeler üretme amacı ile Ar-Ge faaliyetleri uygulanmaktadır. Çalışma yaptığımız Ar-Ge laboratuvarı misyonu gereği kimyasal maddelerle çalışmaktadır. Ar-Ge laboratuvarında genel olarak kimyasal maddeler; Ar-Ge çalışmalarında, kimyasal analizlerde, kimyasal zenginleştirme çalışmalarında kullanılmaktadır.

Ar-Ge laboratuvarında çalışılan kimyasalların her birinin zararı bir diğerine göre farklılık göstermektedir. Kimyasal maddeler birbirinden farklı özellik göstermeleri nedeniyle her birinin kullanan veya temas edenlere verecekleri zararlar farklıdır. Kimyasalları kullanan veya temas edenlerin yaş, cinsiyet, sağlık öyküleri gibi farklı özellikleri nedeniyle kimyasalların verebileceği zararların şekli ve etkilenme süresi de farklılık göstermektedir. Bazı kimyasal maddelerin zararlı etkileri diğer kimyasallara göre daha fazla olmaktadır. Kimyasallarla yapılan çalışmalarda karışım oluşturulması veya çalışma ortamında fiziksel koşulların değiştirilmesi gibi durumlarda beklenenden farklı zararlarla karşılaşma ihtimali vardır. Bazı kimyasal maddelerin yaratacağı zararların etkileri uzun süre sonra görülmektedir. Kısa vadede zararlarının etkileri fark edilmeyen kimyasallar zararsız gibi görülse de uzun vadede zararlarının etkileri ortaya çıkacaktır. Bu nedenle her bir kimyasal madde tehlikeli olarak değerlendirilmelidir [1].

Ar-Ge laboratuvarında kimyasal maddelerle yapılan çalışmalarda karşılaşılması muhtemel riskleri ortadan kaldırmak için risklerin belirlenmesi, değerlendirilmesi, çalışma süreçlerinin titizlikle uygulanması ve koruyucu önlemlerin alınması gerekmektedir. Bu makalede kimyasal maddelerle yapılan çalışmalarda; kimyasal maddelerin sınıflandırılması, etiketlenmesi, ambalajlanması, depolanması, taşınması ve oluşan kimyasal atıkların bertarafında uyulması gereken yasal mevzuat ve kurallar incelenmiştir.

2. KİMYASAL MADDELERİN SİNİFLANDIRILMASI (CLASSIFICATION OF CHEMICAL SUBSTANCES)

Kimyasalların özelliklerinin ve zararlarının bilinmesi kimyasallardan kaynaklanan risklerin kontrol altına alınabilmesi için ilk ve en önemli adımdır. Kimyasal maddelerin özellikleri nedeniyle son derece karmaşık olan bu bilginin, kullanıcılar tarafından kolay ve aynı şekilde anlaşılacak, zararları ve önlemleri içerecek şekilde düzenlenmesi gerekir. Sınıflandırma, ambalajlama ve etiketleme sistemleri bu amaçlarla geliştirilmiştir.

Dünyada ve ülkemizde kimyasallar ve tehlikeli maddelerin sınıflandırılmasında çok farklı uygulamalar söz konusudur. Kimyasal maddelerin sınıflandırılmasında; kimyasal maddelerden kaynaklanan potansiyel tehlikeler esas alınmaktadır. Kimyasal maddelerden kaynaklanan potansiyel tehlikeler; fizikokimya, toksikoloji ve çevre ile ilgili olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır.

Fizikokimya; kimyasal maddelerin özelliklerini ve farklı koşullardaki davranışlarını inceleyen, farklı koşullardaki davranışlarına ilişkin yasaları belirleyen bilim dalıdır [2]. Bu kapsamda kimyasal maddelerin; patlayıcılık, oksitlenme, alev alma gibi özellikleri sınıflandırılır.

Toksikoloji zehir ile ilgilenen bir bilim dalıdır. Toksikoloji; organizmanın normal yaşamını sürdürmesi sırasında gerçekleştirdiği kimyasal tepkimeler için gerekli olmayan yabancı kimyasal maddeler ile ilgilenir [3]. Toksikoloji bilimi ile kimyasal maddelerin insan sağlığına zararları belirlenerek kimyasal maddeler sınıflandırılır.

Toksikoloji biliminin alt dalı olan ekotoksikoloji, başta kimyasalların toprak, sucul ortam ve hava olmak üzere çevre üzerindeki olumsuz etkilerini inceleyen bir bilim dalıdır [4]. Ekotoksikoloji bilimi ile kimyasal maddelerin su, hava ve toprak üzerindeki zararları belirlenerek kimyasal maddeler sınıflandırılır.

Kimyasal maddeler farklı amaçlar için, farklı kuruluşlar tarafından değişik sınıflandırmalara tabii tutulmuştur. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan sınıflandırmalar; tehlikeli maddelerin taşınmasında kullanılan Tehlikeli Madde

Taşımacılığı (ADR) sözleşmesine göre sınıflandırma, çalışma hayatında kullanılan Uluslararası Çalışma Örgütüne (ILO) göre sınıflandırma ile kimyasal maddelerin üretilmesi, pazarlanması, depolanması ve kullanılmasında faydalanılan CLP Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Tüzüğüne göre yapılan sınıflandırmadır.

2.1. Tehlikeli Madde Taşımacılığı Sözleşmesine Göre Sınıflandırma (Classification According to ADR Contract)

30 Kasım 2005 tarihli ve 5434 sayılı Kanun ile kabul edilen Tehlikeli Malların Karayolu ile Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşmasına paralel olarak 24 Ekim 2013 tarihinde Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik hazırlanmıştır [5]. ADR sözleşmesine göre tehlikeli maddeler;

- Patlayıcılar
- Gazlar
- Parlayıcı sıvılar
- Parlayıcı katılar
- Oksitleyici maddeler
- Organik peroksitler
- Toksik maddeler
- Bulaşıcı maddeler
- Radyoaktif maddeler
- Korozif maddeler
- Diğer muhtelif madde olarak sınıflandırılmaktadır [6].

2.2. Uluslararası Çalışma Örgütüne (ILO) Göre Sınıflandırması (Classification According to ILO)

Kimyasalların Kullanımında Güvenlik Hakkındaki 170 no'lu Sözleşme Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) tarafından 1990 yılında kabul edilmiştir. Sözleşme ile kimyasalların sınıflandırılmasının kimyasallardan kaynaklanan sağlık ve fiziksel tehlikeler esas alınarak, yetkilendirilmiş kuruluşlar tarafından belirlenen standartlara göre yapılması kararlaştırılmıştır [7]. Yapılan çalışmalar sonrası hazırlanan 177 Sayılı Tavsiye Kararına göre kimyasallar aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

- Parlayıcı

- Patlayıcı
- Oksitleyici
- Reaktif
- Zehirli
- Tahriş edici
- Aşındırıcı
- Hassasiyet oluşturu
- Kanserojen olan
- Üremeyi etkileyen
- Mutajenik etkiler [8].

2.3. CLP Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Tüzüğüne Göre Sınıflandırması (Classification According to CLP)

Avrupa Birliğinde (AB) madde ve karışımların sınıflandırılması, etiketlenmesi ve ambalajlanmasında yasal mevzuat olarak 1272/2008 sayılı CLP Tüzüğü kullanılmakta olup, tüzük 20 Ocak 2009 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Kimyasal madde ve karışımları üreten, ithal eden, dağıtımını yapan ve kullanan tedarikçiler yasal olarak tüzüğe uymak zorundadır. CLP Tüzüğü kabul edilen takvime bağlı olarak Tehlikeli Maddeler Direktifi (DSD-67/648/EEC) ve Tehlikeli Karışımlar Direktifi (DPD-1999/45/EC)'nin yerine kullanılacaktır [9]. Aynı zamanda CLP Tüzüğü Birleşmiş Milletlerin kimyasal maddelerin sınıflandırma ve etiketlenmesinde kullandığı Küresel Uyumlaştırma Sisteminde yer alan ölçütleri de karşılamaktadır.

Ülkemizin Avrupa Birliği çevre mevzuatına uyum çalışmaları kapsamında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 11.12.2013 tarihinde 28848 sayılı resmi gazetede "Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik" (SEA) yayımlanmıştır. SEA Yönetmeliği; kimyasal madde ve karışımların toprak, sucul ortam, hava başta olmak üzere çevre ve insan sağlığı üzerinde oluşturacağı zararlı etkilerden korunabilmek için önlem almak, piyasaya sunularında ve kullanımlarında güvenliği sağlamak amacıyla gerçekleştirilecek sınıflandırılma, etiketlenme ve ambalajlanmada uygulanacak teknik usul ve esasları düzenlemek, idari işlemleri belirlemek amacı ile hazırlanmıştır [10].

Yasal mevzuatımız olan Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmeliğine göre kimyasalların sınıflandırılması aşağıdadır.

Fiziksel Zararlar

- Patlayıcı
- Alevlenir gaz
- Alevlenir aerosol
- Oksitleyici gaz
- Basınç altındaki gazlar
- Alevlenir sıvı
- Alevlenir katı
- Kendiliğinden tepkimeye giren madde veya karışım
- Piroforik sıvı
- Piroforik katı
- Kendiliğinden ısınan madde veya karışım
- Suyla teması halinde alevlenir gaz çıkaran madde veya karışım
- Oksitleyici sıvı
- Oksitleyici katı
- Organik peroksit
- Metaller için aşındırıcı madde veya karışım

İnsan Sağlığına Yönelik Zararlar

- Akut toksisite
- Cilt aşınması/tahrişi
- Ciddi göz hasarı/göz tahrişi
- Solunum/cilt hassaslaştırma
- Eşey hücre mutajenitesi
- Kanserojenite
- Üreme Sistemi Toksikitesi
- Belirli Hedef Organ Toksikitesi- Tek/Tekrarlı maruz kalma
- Aspirasyon zararı

Çevreye Yönelik Zararlar

- Sucul ortam için zararlı
- Ozon tabakası için zararlı [9].

3. MALZEME GÜVENLİK BİLGİ FORMLARI (MATERIAL SAFETY DATA SHEET)

Malzeme güvenlik bilgi formu; kimyasal maddelerin ve müstahzarların özellikleri ile ilgili detaylı bilgilerin yer aldığı, kimyasal madde ve müstahzarın özelliklerinden kaynaklanan tehlikelerden korunmak için alınacak güvenlik önlemlerinin açıklandığı, kimyasal maddelerin ve müstahzarların insan sağlığı ve çevre için oluşturduğu risklerinden korunmaya yönelik gerekli bilgilerin bulunduğu belgedir [11].

Malzeme güvenlik bilgi formunda; madde, müstahzar ile şirket veya iş sahibinin tanıtımı, kimyasalın içindekiler hakkında bilgi, kimyasalın sınıflandırılması, insan ve çevreye verebileceği zararların yanı sıra ilk yardım, yangınla mücadele, kaza sonucu yayılma önlemleri, elleçleme ve depolamada dikkat edilecek hususlar, maruziyet kontrolleri, kişisel korunma tedbirleri, fiziksel ve kimyasal özellikler, kararlılık ve tepkime, toksikoloji, ekoloji, bertaraf etme, taşımacılık, mevzuat bilgileri bulunmaktadır [12].

Malzeme güvenlik bilgi formunda Küresel Uyumlaştırma Sistemi tarafından belirlenen tehlike cümleleri/zarar ifadeleri ve önlem cümleleri/önlem ifadeleri yer almaktadır. Ayrıca malzeme güvenlik bilgi formunda kimyasal maddelerin sınıflandırma kodları da bulunmaktadır [13].

Malzeme güvenlik bilgi formunda yer alan zararlılık ifadesi; zararlı bir madde veya karışımın oluşturacağı zararların niteliğini ve koşulların uygun olması halinde ortaya çıkabilecek zararlılık derecesini belirten ifadelerdir. Zararlılık işareti; zararlı ilgili bilgilerin açıklanması için belirlenmiş standart sembol, motif, renk gibi unsurlarını içeren grafiksel şekildir. Zararlılık sınıfı; zararlı bir madde veya karışımın fiziksel, insan sağlığı ve çevreye yönelik oluşturacağı zararın niteliğini, ifade eder zararlılık kategorisi; zararlı bir madde veya karışımın zararlılık sınıfının ortaya çıkartacağı zararın ciddiyetini açıklayan ölçütlerdir [10].

Önlem ifadesi ise kimyasal madde ve karışımlarının kullanımı veya bertarafı esnasında maruziyet sonucu oluşacak olumsuz etkileri öncelikle önlemek bunun mümkün olmaması halinde en aza indirmek amacıyla alınması istenilen önlemleri açıklayan ifadedir. Malzeme güvenlik bilgi formunda önlem ifadeleri kapsamında; genel amaçlı, tedbir amaçlı, müdahale amaçlı, depolama ile ilgili, bertaraf amaçlı önlem ifadeleri ve kodları yer almaktadır [10]. Malzeme güvenlik bilgi formları kimyasal madde ve karışımlarının güvenli kullanımları için ihtiyaç duyulan bilgileri içermektedir. Çalışma ortamında kimyasal risk etmenlerinin kontrol edilmesinde en önemli rehberdir.

4. KİMYASAL MADDELERİN ETİKETLENMESİ VE AMBALAJLANMASI (LABELLING AND PACKAGING OF CHEMICALS)

Etiketleme ve ambalajlama kimyasal maddelerin ve karışımlarının zarar görmeden kullanılması ve depolanması için önemlidir. Kimyasalın etiketlenmesi ve ambalajlanması Tehlikeli Maddelerin ve Müstahzarların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik (SEA) esaslarına uygun yapılmaktadır. Kimyasal maddeler ve karışımları piyasaya sunulmadan önce SEA esaslarına göre sınıflandırılır. Kimyasal madde veya karışım zararlı olarak sınıflandırılmış ise piyasaya sunulmadan önce etiketlenerek ambalajlanmalıdır [10].

4.1. Kimyasal Maddelerin Ambalajlanması (Packaging of Chemicals)

Kimyasal maddelerin ambalajlanması 11 Aralık 2013 tarihli, 28848 (Mükerrer) sayılı SEA esaslarına uygun yapılmaktadır. Ambalaj; kimyasal madde veya karışımı dış etkenlerden koruyan kapların tamamıdır. Ambalajlama; koruma ve bilgi verme dahil güvenlik işlemlerini yerine getirmek amacıyla koruyucu malzeme ve ambalaj kapları kullanarak kimyasal madde ve karışımların kaplara yerleştirilmeleri işlemidir. Ara ambalaj; iç ambalaj ile dış ambalaj arasına yerleştirilen ambalajdır [10].

Zararlı maddeyi veya karışımı içeren ambalaj daha özel güvenlik aksamının öngörüldüğü durumlar haricinde, içindeki kimyasal maddeleri ambalaj dışına sızdırmayacak şekilde olmalıdır. Ambalaj ve kapatma aksamının yapıldığı malzemeler içerisindeki kimyasal ile reaksiyona girerek zararlı bileşikler oluşturmamalı, kimyasalın neden olabileceği hasarları önlemelidir. Ambalaj ve kapatma aksamı, elleçleme işlemlerinde tehlike oluşturmamalı, elleçleme faaliyetinde aksamalara neden olmamalı, gevşemeyecek şekilde sağlam ve dayanıklı olmalıdır. Kapatma aksamı değiştirilebilir olarak tasarlanmış ambalajlarda, kapatma aksamı kimyasallar ambalaj dışına çıkmadan kapatılabilecek şekilde yapılmalıdır [10].

Halkın kullanımına arz edilen veya satılan zararlı maddeleri veya karışımları içeren ambalajlar

çocukların ilgisini çekecek şekilde tasarlanmamalıdır. Zararlı kimyasal madde veya karışımlarda tüketicileri yanlış yönlendirebilecek, hatalı kullanıma sevk edecek özellikler taşıyan, gıda, kozmetik, tıbbi ürünlerle karıştırmaya neden olabilecek ambalajlar kullanılmamalıdır. Kapasiteleri ne olursa olsun çok toksik, toksik veya aşındırıcı kimyasalların bulunduğu kaplar ile zararlı, çok kolay alevlenir veya kolay alevlenir kimyasalların konulduğu kaplarda dokunsal tehlike işareti bulunmalıdır. Ayrıca bu kaplar çocukların açmaması için dayanıklı kapatma aksamı ile kapatılmalıdır [10]. SEA’da dokunsal uyarı cihazları ile yeniden kapatılabilir ve yeniden kapatılmaz ambalajlarla ilgili uyulması gereken belli standartlar yer almaktadır. Bu standartlara uygunluk, yalnızca yeniden düzenlenmiş TS EN ISO/IEC 17025 Standardına uygun olan laboratuvarlar tarafından onaylanır [10].

Ambalajlanmış kimyasal madde ve karışım, ambalaj kabına bulaşmamalıdır. Sıvı haldeki kimyasal madde ve müstahzarlarda meydana gelebilecek genleşmelerden kaynaklanan patlama, açılma, vb. tehlikeleri önlemek için ambalajlanmasında kullanılan kaplarda boş hacim bırakılmalıdır. Kimyasal maddeler birden fazla kap kullanılarak ambalajlanmışsa iç kaptan dış kaba sızma olmamalıdır. Ambalajlamada kırılğan özellikte kapların kullanılması halinde kırılğan kapların kırılmanın önlenmesi için tedbirler alınmalıdır [10].

Birbiri ile şiddetli reaksiyon veren maddeleri içeren iç kaplar, bir arada ambalajlanmamalı, farklı dış kaplar kullanılmalıdır. Çok tehlikeli olmaları nedeniyle bir sıvı ile seyreltilerek veya ıslatılarak muhafaza edilen kimyasallar sızma veya dökülme tehlikesi tamamen önlenmiş şekilde ambalajlanmalıdır. Ambalaj malzemelerinin tamamı kullanım amacına uygun fonksiyon testlerinden geçirilmelidir [10].

Depolama ve taşıma esnasında ısı ve hava basıncı değişimi, çalkalanma gibi sebeplerle, kap içinde gaz oluşuyor ve gaz oluşumu nedeniyle kabın iç basıncı artıyorsa, oluşan gazı dışarı tahliye ederek basıncı ayarlayacak sistemlere sahip kaplar kullanılmalıdır. Ayrıca tahliye edilen gazın tehlike ve zararları önlenmelidir [10].

Kimyasal madde üreticileri ambalaj malzemesi kullanımının ve ambalaj malzemesi atığı oluşumunun en az düzeyde olması için gerekli

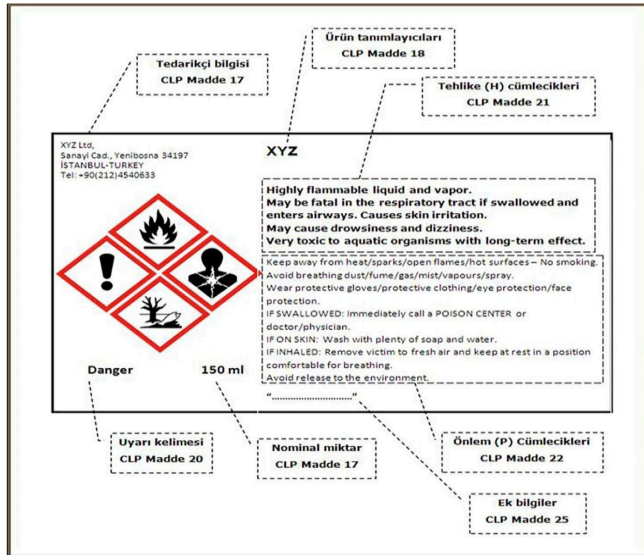
önlemleri almalıdır. Alınan önlemlere rağmen oluşan ambalaj malzeme atıkları üreticiler tarafından bertaraf edilecek ve bertaraf maliyeti karşılanacaktır [14].

4.2. Kimyasal Maddelerin Etiketlenmesi (Labeling of Chemicals)

Kimyasal maddelerin etiketlenmesi 11 Aralık 2013 tarihli, 28848 (Mükerrer) sayılı SEA esaslarına uygun yapılmaktadır. Patlayıcıların etiketi yönetmeliğin kapsamı dışındadır [10].

Ambalajlanmış zararlı olan madde veya karışımlarda Şekil-4.1.'deki etiket bulunur. Etiket aşağıdaki bilgileri içerir:

- Tedarikçinin adı, açık adresi ve iletişim numarası
- Miktarın sadece ambalaj üzerinde belirtilmemesi durumunda, satışa sunulan ambalaj içindeki madde veya karışımın nominal hacim veya ağırlığı
- Maddenin veya karışımın kimyasal kimliği
- Zararlılık işaretleri
- Uyarı kelimeleri
- Zararlılık ifadeleri
- Önlem ifadeleri
- İlave bilgi bölümü [10].



Şekil-4.1 Kimyasal madde etiketi (Chemical label)

Kimyasallara ait etiketlerde tedarikçinin belirleyeceği sıraya göre zararlılık işaretleri, zararlılık ifadeleri, önlem ifadeleri ve uyarı kelimeleri yer alır. Etiket yer alan tüm zararlılık ve önlem ifadeleri dil esas alınarak gruplandırılır. Etiketlerde toksik değildir, zararsızdır, kirletici değildir, ekolojiktir ifadeleri kullanılmaz [10].

Türkiye’de piyasaya sunulan karışımların ve zararlı maddelerin etiketleri Türkçe hazırlanır. Tedarikçiler, etiketlerinde aynı detayların yer alması şartıyla, Türkçeden farklı diller de kullanabilir. Ambalaj normal konumdayken etiket üzerindeki bilgiler Türkçe okunabilecek şekilde ambalajın bir veya birden fazla yüzeyine sıkıca yapıştırılır [10].

Kimyasalın ambalajı etiketleme kurallarını karşılayamayacak yapıda, şekilde veya küçüklükte ise; etiketlemede katlanan, asılan etiket kullanılabilir veya etiket bilgileri dış ambalajda yer alır. Etiket bilgilerinin dış ambalajda yer alması halinde iç ambalajda kullanılan etikette zararlılık işaretleri, madde ve karışımın kimliği, tedarikçisinin adı ve iletişim bilgileri yer alır [10].

Etiketlerde zararlılık işaretlerinin net olarak görünmesini sağlayacak sunum ve renk kullanılmalıdır. Etiket yer alan bilgiler anlaşılır ve silinemeyecek şekilde yazılır. Bilgiler açık şekilde görülüp kolay okunabilecek boyut ve aralıkta olur [10]. Uyarı kelimeleri, zararlılık ve önlem ifadeleri ile tamamlayıcı bilgilerin harf boyutu tedarikçinin kararına bırakılmıştır. Etiket bilgilerinin okunmasını sağlamak için harf boyutunun en az 1.8 mm olması tavsiye edilmektedir. Etiketın SEA’da belirlenen boyutlarda olması ve etiket bilgilerinin okunması halinde Türkçenin yanı sıra kullanılacak dil sayısına tedarikçi karar verecektir [15].

Etiket SEA yönetmeliğinde belirtilen tüm etiket bilgilerini içerecek büyüklükte tasarlanmalıdır. Zorunlu etiketleme bilgilerinin yer aldığı etiket alanının en az on beşte birini zararlılık işareti kapsayacaktır. Etiketlemede en az boyutlara uyulması halinde etiket bilgilerinin okunurluğu sağlanacaktır. Etiket zorunlu olmayan ilave etiket bilgileri yer alacaksa bilgilerin okunabilirliği sağlanmalıdır. Bu durumda zorunlu olmayan bilgiler kısıtlanmalı veya etiket boyutu artırılmalıdır. Etiket boyutunu arttırması durumunda, zorunlu etiket elemanlarının boyutunun da arttırması düşünülmelidir [15].

Ambalaj üzerinde yer alan etiket bilgileri SEA yönetmeliğine uygun olmalıdır. Kimyasalların ambalajları üzerinde etiket bilgileri anlaşılır şekilde bulunuyorsa ayrıca etiket yapıştırılmasına ihtiyaç yoktur. Ara, dış ve iç ambalajlamanın birlikte uygulandığı ambalajlarda, dış ambalajda tehlikeli malların taşınmasına yönelik etiket

bilgilerinin yer alması durumunda ara ve iç ambalaj SEA hükümleri uyarınca etiketlenir. İsteğe bağlı olarak dış ambalaj da SEA hükümlerine göre etiketlenebilir [10].

SEA yönetmeliği esaslarına göre etiketlerde yer alması gereken zararlılık işaretlerinin, tehlikeli malların taşınması için gerekli zararlılığı belirtmesi durumunda dış ambalaj üzerinde zararlılık işaretinin yer almasına gerek yoktur. Kimyasalın dış ambalajının tehlikeli malların taşınması için gerekli etiketlemeyi karşılaması gerekmediğinde dış, iç ve ara ambalaj SEA hükümleri uyarınca etiketlenir. Dış ambalajdan iç ya da ara ambalajda yer alan etiketler açıkça okunabiliyorsa dış ambalajın etiketlenmesine gerek yoktur [10].

Tekli ambalajlar SEA ve tehlikeli malların taşınması esaslarına uygun etiketlenir [10]. SEA yönetmeliğinde etikette yer alacak bilgilerin konumunu belirleyen kurallar yer almakla birlikte etiket bilgilerinin konumunu belirleme etiketi hazırlayanların takdirine bırakılmıştır [15].

Maddenin veya karışımın içeriğinin ciddi zararlılık sınıfında sınıflandırılması halinde veya ilave etiket unsurlarının gerekli olması halinde etiket bilgileri bir an önce güncellenmelidir. Diğer hallerde 18 ay içerisinde güncelleme yapılabilir [10].

Ambalajın dikey konumda olması nedeniyle yatay konumda olan etiketin okunması zorlaşmaktadır. Ayrıca etikette yer alan bilgiler okumayı engelleyecek boyutta ve konumda olabilir. SEA yönetmeliği etiketin şekil veya yapısı nedeniyle istenilen koşulları karşılamayan ve çok küçük olan ambalajlar için ayrıcalıklar uygulanmaktadır. Etiketlerin SEA yönetmeliği esaslarını karşılamayacak durumda olması halinde katlanır, asılır etiketler kullanılabilir veya dış ambalajda etiketleme yapılabilir. SEA yönetmeliğinde belirtilen ayrıcalıkların kullanılması halinde, dış ambalajda etiketleme yapılmışsa iç ambalajda kullanılacak etikette veya ambalaj üzerine yapıştırılan etikette en azından madde veya karışımı tedarik edenin adı ve telefon numarası, ürüne ait kimlik bilgileri ve zararlılık işaretleri bulunmalıdır. Bu durumda uyarı kelimeleri, zararlılık ve önlem ifadeleri ile ilave etiket bilgileri yer almayabilir [15].

İç ambalajda yer alan etiketin çok geniş olması ve kimyasala ait tamamlayıcı bilgilerin fazla olması

durumunda katlanır etiketler kullanılmaktadır. Katlanan etiketler asılan etiketlere nazaran; etiket bilgileri için daha fazla alan sağladığı için daha çok tercih edilmektedir [15].

Asılan ve katlanır etiketler normal etiketle aynı işlevi yerine getiren, aynı özelliklere sahip etiketlerdir. Asılan ve katlanır etiketlerde yer alan bilgilerin okunması kolaydır ve bilgiler silinmezdir. Normal etiketlerde olduğu gibi arka plana sahiptirler. Normal şartlarda katlanır etiket veya asılan etiketlerin ve etikette yer alan zararlılık işaretinin boyutu normal etiketle aynı olmalıdır. Katlanır veya asılan etiketler ambalajın taşınması esnasında çıkmayacak şekilde ambalaja sabitlenmelidir. Katlanan etiketin iç ambalajdan çıkartılarak bir broşür olarak kullanılması tasarlanmışsa SEA'da belirtilen bilgilerinin ambalajda da olması gerekmektedir [15].

Etiketleme yapılan kimyasal etiketin baskısının bozulmasına neden olacaksa katlanan etikete koruyucu bir kaplama yapılmalıdır. Ambalaj içeriği etiket baskısına zarar veriyorsa ve katlanan etiketin yalnız dış sayfası kaplanmışsa zorunlu etiket bilgileri dış sayfada, zorunlu olmayan tamamlayıcı bilgiler ise iç sayfada yer almalıdır [15].

30.11.2000 tarihinde 24246 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Aerosol Kapları Yönetmeliği gereği aerosol dağıtıcıları küçük aerosol ambalajlarını alevlenir olarak etiketleyebilirler [15]. 25 ml'lik hacimden daha küçük olan tek kullanımlık ambalajlarda bulunan maddeler veya karışımların tüm etiket bilgileri ambalajda bulunmayabilir. Bu durumda etiket bilgilerinin tamamı dış ambalajda bulunmalıdır. Ancak 25/03/2011 tarihinde 27885 sayılı Resmi Gazetede yayımlanan Bitki Koruma Ürünlerinin Sınıflandırılması Ambalajlanması ve Etiketlenmesine Dair Yönetmelik ile 31.12.2009 tarihinde 27449 dördüncü mükerrer sayılı Resmî Gazetede yayımlanan Biyosidal Ürünler Yönetmeliği kapsamındaki ürünlerde bu kural uygulanmaz [15].

5. KİMYASAL MADDELERİN DEPOLANMASI (STORAGE OF CHEMICALS)

Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelikte depolama önlem ifadeleri yer almakla birlikte ülkemizde kimyasal maddelerin

bir arada depolanması esas ve kurallarını belirleyen yasal mevzuat bulunmamaktadır. Türkiye Kimya Sanayicileri Derneği kimyasal maddelerin bir arada depolanmasında rehber olarak kullanılması amacıyla “Alman Kimya Sanayicileri Federasyonu- Verband Der Chemischen Industrie e.VCI.” tarafından hazırlanmış rehberi geniş bir uygulama alanı olması nedeniyle düzenleyerek kullanıma sunmuştur. Bahse konu doküman sabit kaplar, tank çiftlikleri, dökme mal depoları ve ara malların geçici depolama alanlarında uygulanmamaktadır [16]. Bu bölümde her iki dokümanda yer alan bilgiler değerlendirilerek kimyasalların depolanmasında uygulanması gereken kurallar incelenecektir.

5.1. Kimyasalların Depolama Sınıfları (Storage Classifications of Chemicals)

Depolama sınıfları, Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik, Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik, Madde ve karışımların sınıflandırma, etiketleme ve paketlemesi hakkındaki Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) uyumlu AB tüzüğü (EC) No 1272/2008 AB direktiflerine dayanmaktadır [6], [10], [13], [16], [17].

Depolama sınıfları aşağıdadır.

- Depolama Sınıf 1: Patlayıcı maddeler, Depolama Sınıfı 2 A: Aerosol kapları ve tutuşturucular hariç gazlar,
- Depolama Sınıfı 2 B: Aerosol kapları ve tutuşturucular,
- Depolama Sınıfı 3 A: 50°C’de buhar basıncında en fazla 300 kPa (3 bar) olan alevlenir sıvılar,
- Depolama Sınıfı 3 B: 50°C’de buhar basıncı en fazla 300 kPa (3 bar) olan, su ile karışmayan ve P.N. 55°C ila 100°C arasında olan alevlenir sıvılar,
- Depolama Sınıfı 4.1 A: Diğer patlayıcı tehlikeli maddeler,
- Depolama Sınıfı 4.1 B: Alevlenir katılar,
- Depolama Sınıfı 4.2 A: Havada kendiliğinden tepkimeye giren piroforik madde veya kendiliğinden ısınan maddeler,

- Depolama Sınıfı 4.3: Su ile temas ettiğinde alevlenir gazlar açığa çıkaran tehlikeli maddeler,
- Depolama Sınıfı 5.1 A: Güçlü oksitleyici maddeler,
- Depolama Sınıfı 5.1 B: Oksitleyici maddeler,
- Depolama Sınıfı 5.1 C: Amonyum nitrat ve amonyum nitrat içeren karışımlar,
- Depolama Sınıfı 5.2: Organik peroksitler ve kendiliğinden tepkimeye giren maddeler,
- Depolama Sınıfı 6.1 A: Yanıcı, akut toksik maddeler, kategori 1 ve 2 çok toksik maddeler,
- Depolama Sınıfı 6.1 B: Yanıcı olmayan akut toksik maddeler, kategori 1 ve 2 çok toksik maddeler,
- Depolama Sınıfı 6.1 C: Yanıcı akut toksik maddeler, kategori 3 toksik veya kronik etkisi olan tehlikeli maddeler,
- Depolama Sınıfı 6.1 D: Yanıcı olmayan akut toksik maddeler, kategori 3 toksik veya kronik etkisi olan tehlikeli maddeler,
- Depolama Sınıf 6.2: Bulaşıcı maddeler,
- Depolama Sınıfı 7: Radyoaktif maddeler,
- Depolama Sınıfı 8 A: Yanıcı aşındırıcı maddeler,
- Depolama Sınıfı 8 B: Yanıcı olmayan aşındırıcı maddeler
- Depolama Sınıfı 9: Muhtelif tehlikeli maddeler ve nesnelere,
- Depolama Sınıfı 10: Sınıf 3 A ve 3 B’de sınıflandırılmayan yanıcı sıvılar,
- Depolama Sınıfı 11: Depolama sınıflarından hiçbirine giremeyen yanıcı katılar,
- Depolama Sınıfı 12: Depolama sınıflarından hiçbirine giremeyen yanıcı olmayan sıvılar,
- Depolama Sınıfı 13: Depolama sınıflarından hiçbirine giremeyen yanıcı olmayan katılar [16].

5.2. Güvenli Depolama Aşamaları (Safety Storage Stages)

Kimyasallar özellikleri nedeniyle depolanmada potansiyel tehlike oluşturmaktadır. Kimyasalların özellikleri, oluşturabilecekleri tehlike ve kimyasallardan kaynaklanan risk etmenleri güvenli depolama için sorun teşkil etmektedir. Bu nedenle güvenli depolamanın sağlanabilmesi için

uyulması gereken kurallar oldukça önem taşımaktadır.

Depolamada risklerin önlenmesi ve güvenliğin sağlanması için yapılması gereken ilk işlem tehlikeli kimyasalların güncel envanterinin hazırlanmasıdır. Envanterin hazırlanması kimyasallardan kaynaklanan potansiyel tehlikelerin de belirlenmesini sağlayacaktır. Envanter hazırlanırken satın alınan kimyasallara ait kayıtlardan ve depo kayıtlarından yararlanılır. Ancak kimyasal deposunu titiz bir şekilde dolaşarak depoda bulunan kimyasalların listesini çıkartmak en güvenilir yöntemdir [18].

Hazırlanacak envantere kimyasalın adı, formülü, markası, miktarı, adedi, ambalaj durumu, tehlike sınıfı ve depolandığı yer, tarih, gibi bilgiler yer almalıdır. Envanter kayıtlarında kimyasallara ait bilgilerin yanı sıra envanteri hazırlayan kişiye ait bilgiler ve envanterin hangi bina için yapıldığına ilişkin bilgiler de bulunmalıdır. Envanter hem kullanımda olan hem de atık durumdaki kimyasallar için hazırlanmalıdır. Envanter listesi hazırlanan kimyasalların tamamı etiketlenmelidir. Kimyasalların etiketlenmesi kimyasallardan kaynaklanan fiziksel, çevresel ve insan sağlığını etkileyen risklerin belirlenmesine olumlu katkı sağlayacaktır. Belirlenen risklerin analizinin yapılması ve önlemlerin alınması ile de oluşması muhtemel acil durumlar, iş kazaları, meslek hastalıkları önlenecek ve güvenli depolama şartları sağlanacaktır [18].

Tanımlanmamış veya tanımlandığı halde etiketlenmemiş kimyasallar belli bir süre sonra kimyasal atığa dönüşecektir. Tanımlanmamış kimyasal insan sağlığı ve çevre için tehlike oluşturmaktadır. Tanımlanmamış kimyasalların kimliklerinin tespit edilmesi maliyetli ve uzun bir süreçtir. Laboratuvarda kullanılan tüm kimyasalların ilk anda etiketlenmesi ve bu sayede kimliği bilinmeyen kimyasallar oluşumunun önlenmesi gerekmektedir [18].

Kimyasalların etiketlenmesinde kısaltma kullanılmamalıdır. Etiketleme yapılan kimyasalın ismi formül kullanılmadan tam ve açık olarak yazılmalıdır. Etiketle kimyasalın tehlike sınıfı, son kullanma ve üretim tarihleri yer almalıdır. Zamana hassas ve tehlike riski yüksek kimyasal maddelerin üretim, satın alınma tarihleri ile ambalajlarının açılma tarihleri etiketinde belirtilmelidir. Kimyasalların depolandığı büyük kaplar ve

konteynerler içlerinde saklanan kimyasala ait tehlike sınıflarına uygun işaretlerle etiketlenmelidir. Tehlikeli olmayan kimyasalların etiketlenmesinde yeşil, tehlikeli kimyasalların etiketlenmesinde turuncu renk etiket kullanılmalıdır. Kimyasallara ait etiketlerin kolay okunur olmasına dikkat edilmelidir [18].

Uyumlu ve uyumsuz kimyasal maddeler; maddenin halleri, genel kimyasal yapısı, pH değeri, tehlike sınıfı değerlendirilerek tespit edilmelidir. Gruplandırılan kimyasal maddeler birbirleri ile etkileşime girip, tehlikeli reaksiyona sebep vermemeleri için Tablo-5.1.'deki kimyasal depolama matrisine uygun depolanabilir [19].

Tablo 5.1. Kimyasal depolama matrisi (Chemical storage matrix)

SINIF	Alevlenir Gazlar	Alevlenir ve Toksik Olmayan Gazlar	Toksik Gazlar	Alevlenir Sıvılar	Alevlenir Katılar	Kendiliğinden yanabilen	Su ile temas ettiğinde tehlike oluşturan	Oksitleyici	Organik Peroksit	Toksik	Aşındırıcı
Alevlenir Gazlar	A	E	C	B	B	D	B	D	D	C	B
Alevlenir ve Toksik Olmayan Gazlar	E	A	B	E	E	E	E	B	E	B	B
Toksik Gazlar	C	B	A	C	C	C	C	C	C	B	B
Alevlenir Sıvılar	B	E	C	A	B	D	B	D	D	C	B
Alevlenir Katılar	B	E	C	B	A	D	B	D	D	C	B
Kendiliğinden yanabilen	D	E	C	D	D	A	B	D	D	C	B
Su ile temas ettiğinde tehlike	B	E	C	B	B	B	A	D	D	C	D
Oksitleyici	D	B	C	D	D	D	D	A	D	F	D
Organik Peroksit	D	E	C	D	D	D	D	D	A	F	D
Toksik	C	B	B	C	C	C	C	F	F	A	B
Aşındırıcı	B	B	B	B	B	B	D	D	D	B	G

A- Depolama sınıfı aynı olan kimyasal maddeler genellikle uyumlu olarak kabul edilir.

B- Bu grupta yer alan kimyasal maddelerden tepkimeye girecekler güvenlik bilgi forumunda belirtilmiştir. Ancak tüm kimyasal maddelerin birlikte depolandığı diğer kimyasallarla uyumuna yönelik risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Dökülme, sızıntı, kişisel maruziyet veya yangın gibi acil durumlarda ikinci maddeden kaynaklanan risklerin önlenmesine yönelik tedbirler alınmalıdır.

C- Bu gruptaki kimyasal maddelerin genellikle tepkimeye girmeyecekleri değerlendirilir. Ancak acil durumların ortaya çıkma olasılığı dikkate alınmalıdır.

D- Bu gruptaki kimyasal maddelerin tepkimeye girmesi beklenmelidir. Tepkime meydana gelmesi halinde yangın, patlama olabilir, toksik veya aşındırıcı gazlar açığa çıkabilir. Kimyasal maddelerin bir arada depolanması meydana gelen bir yangını hızlandırabilir. Bu gruptaki kimyasal maddelerin birlikte veya yakın depolanabilmesi risklerinin tamamen kontrol altına alınması gereklidir.

E- Toksik olmayan ve alevlenir gazlar oksitleyici özelliğe sahipse kimyasal maddelerin tepkimeye girmesi beklenmeli ve bu gruptaki kimyasal maddelerin birlikte veya yakın depolanabilmesi risklerinin tamamen kontrol altına alınması

gereklidir. Toksik olmayan ve alevlenir gazların oksitleyici özelliği yoksa birlikte depolandığı diğer kimyasallarla uyumuna yönelik risk değerlendirmesi yapılmalıdır. Acil durumlarda ikinci maddeden kaynaklanan risklerin önlenmesine yönelik tedbirler alınmalıdır.

F- Toksik maddelerin aynı zamanda yanma tehlikesi de varsa kimyasal maddelerin tepkimeye girmesi beklenmeli ve bu gruptaki kimyasal maddelerin birlikte veya yakın depolanabilmesi risklerinin tamamen kontrol altına alınması gereklidir. Toksik maddelerin aynı zamanda yanma tehlikesi yoksa birlikte depolandığı diğer kimyasallarla uyumuna yönelik risk değerlendirmesi yapılmalı ve acil durumlarda ikinci maddeden kaynaklanan risklerin önlenmesine yönelik tedbirler alınmalıdır.

G- Bir arada depolanan kimyasal maddelerden birisi güçlü alkali diğeri yoğunlaştırılmış güçlü asit ise kimyasal maddelerin tepkimeye girmesi beklenmeli ve bu gruptaki kimyasal maddelerin birlikte veya yakın depolanabilmesi risklerinin tamamen kontrol altına alınması gereklidir. Diğer durumda uyumlu olarak kabul edilir.

Depolama matrisinin yanı sıra kimyasal maddeler ayrı ayrı incelenerek hangi kimyasalların birlikte depolanabileceğine karar verilebilir. Tehlike sınıfları aynı olmakla birlikte birbirleri ile temas etmesi halinde tehlike oluşturabilecek kimyasallar da mevcut olup bu kimyasallar malzeme güvenlik formundan tespit edilerek birbirlerinden ayrı depolanmalıdır [19].

5.3. Kimyasal Madde Depolarının Özellikleri (Properties of Chemical Storage)

Kullanılan kimyasal maddelerin depolanacağı binaların özel olarak tasarlanmaları gereklidir. Ulusal mevzuatımızda kimyasal malzeme depo tasarımının ve özelliklerinin neler olacağını belirleyen yasal bir mevzuat mevcut değildir. Ancak Türk Standartları Enstitüsü Kurumu'nun (TSEK) yayınlamış olduğu standartlar mevcuttur [20].

Kimyasal maddelerin doğasında var olan riskleri önlemek amacıyla depolama tesisinin kurulduğunda dikkatli bir planlama yapılmalıdır. Kimyasal madde depolarının tasarımında tehlikeli kimyasallara maruz kalmayı önlemeye ve tasarım sonrası ek risklerin oluşumunu engellemeye dikkat edilmelidir. Bu amaçla ilk olarak ihtiyaç analizi gerçekleştirilir. İhtiyaç analizi tamamlanınca risk değerlendirmesi yapılır. Risk değerlendirmesi için önemli bir bilgi kaynağı da güvenlik bilgi formlarıdır. İhtiyaç analizi ve risk değerlendirmesi, düzenli aralıklarla, depolarda iş kazası meydana geldiğinde ve depolama tesisinde değişiklik meydana geldiğinde yenilenmelidir. Gerçekleştirilen ihtiyaç ve risk analizine bağlı olarak depolama tesisi tasarlanarak inşa edilir [21].

Kimyasal madde depoları risk değerlendirmesi ile tespit edilen tehlikeler dikkate alınarak seçilecek uygun bir konumda, sağlam zeminde, sel sularından etkilenmeyecek arazi üzerinde ve tek katlı olarak inşa edilmelidir. Depo yapımında kullanılan yapı malzemeleri kimyasallara karşı direnç göstermeli, yanmaz özellikte ve temizlenmesi kolay olmalıdır. Erişim yolları, geçitler ve kaçış yolları depolama faaliyetlerine ve kurtarma işlemlerine yeterli düzeyde yapılmalıdır. Depoya ait drenaj sistemi şehir kanalizasyon sistemine veya yağmur suyu tahliye kanalına doğrudan bağlanmamalı ayrı bir toplama çukuru olmalıdır. Depo içerisine mümkün olduğunca elektrik tesisatı yapılmamalıdır. Depo aydınlatması dışarıdan yansıtılan ışık ile sağlanmalıdır. Depo içinde elektrik tesisatına ihtiyaç varsa tesisat patlamaya karşı korumalı olmalıdır. Havalandırma kimyasallardan kaynaklanan gaz, toz ve buharları süratle temizleyecek kapasitede alttan ve üstten karşılıklı olarak yapılmalıdır. Depo rafları veya dolapları depolandıkları kimyasal maddelere direnç göstermelidir. Raf ve dolaplarda kimyasalların dökülmesini ve devrilmelerini önleyecek önlemler alınmalıdır. Depolarda yangın ve patlama önleme sistemleri kurulmalıdır. Kimyasal depoları Sağlık ve Güvenlik İşaretleri Yönetmeliğine uygun olarak işaretlenmelidir [21].

6. KİMYASAL MADDELERİN TAŞINMASI (TRANSPORTATION OF CHEMICALS)

Kimyasal ve fiziksel yapı ve özellikleri nedeniyle yanıcı, yakıcı, kendi kendine veya kolayca ateş alıcı, patlayıcı, parlayıcı, zehirli ve radyoaktif maddeler tehlikeli madde sayılır. ADR Sözleşmesinde taşınması yasaklanan tehlikeli kimyasalların taşınması yapılmaz. Taşınması yasaklanan kimyasal maddeler haricindeki diğer kimyasallar Avrupa Birliği tarafından kabul edilen ADR Sözleşmesi esaslarına uygun yapılmaktadır. ADR Sözleşmesi; tehlikeli maddelerin hava, deniz, kanal, kara ve demiryolu ile taşınmasındaki esas ve kuralları düzenlemektir [14]. Bu bölümde kimyasal maddelerin ADR Sözleşmesi esaslarına göre taşımacılığında ziyade kimyasal maddelerin Ar-Ge laboratuvarında taşınması konusu incelenmiştir.

6.1. Kimyasal Maddelerin Ar-Ge Laboratuvarında Taşınması (Transportation of Chemicals in R & D Laboratory)

Kimyasal madde taşıyan kişiler, taşıdıkları kimyasal maddenin tehlikelerini ve taşıma esnasında meydana gelmesi muhtemel sızma, dökülme gibi acil durumlarda hareket tarzlarını bilmelidir. Elle taşınmasının kolay ve emniyetli olması nedeniyle laboratuvarlarda kullanılan kimyasallar tedarik edilirken en küçük ambalajlar tercih edilmelidir.

Elle yapılan taşımalarda taşıma ekipmanları kullanılmalı, ağır kimyasal maddelerin elle taşınmasına izin verilmemeli, ağır malzemeler kaldırma ve taşıma ekipmanları ile taşınmalıdır. Uzak mesafeler arasında elle taşıma yapılmamalıdır. Kimyasalların elle taşınmasında kullanılan iş ekipmanlarının düşmemesi, devrilmemesi için önlem alınmalı, taşıma arabası ile yapılan taşımalarda arabanın kullanılacağı zeminde arabanın devrilmesine neden olabilecek çatlak, çukur, tümsek vb. bulunmamalı, geçiş güzergâhları yeterli genişlikte olmalıdır. Arızalı ve kullanımı uygun olmayan taşıma iş ekipmanları kullanılmamalı, onarımı tamamlanana kadar laboratuvarında bulundurulmamalıdır. Taşınan kimyasal miktarı az bile olsa toplu taşıma araçları kullanılmamalıdır. Kimyasal madde taşınmasında yolcu asansörleri kullanılmamalı, taşımada gerekli uyarı levhaları kullanılarak yük asansörleri kullanılmalıdır [22].

Kimyasal taşıyan personel tek kullanımlık eldiven ve koruyucu gözlük takmalıdır. Kapı kolları, asansör düğmeleri ve laboratuvar dışındaki diğer yüzeylere sadece eldivensiz el ile dokunulmalıdır. Taşınan kimyasal maddeler açıkça doğru kimyasal adı ile etiketlenmiş olmalıdır. Elle yazılmış etiketler kabul edilebilir. Laboratuvarında sentezlenmiş bileşiklerin küçük miktarları hariç etiketlere kimyasal ve yapısal formüller yazılması uygun değildir [22].

Kimyasal kabın kapağının kapalı olmasına dikkat edilmelidir. Kimyasallar taşıma kaplarına kapakları üste gelecek şekilde konulmalıdır. Kimyasalların taşınmasında ısı oluşturabilecek, reaksiyona neden olabilecek maddelerden yapılmış iş ekipmanları kullanılmamalıdır [22].

Orjinal kaplarındaki yanıcı sıvılar asit taşıma kovaasına konulmalıdır. Yanıcı sıvıların taşınması esnasında basınca dayanıklı emniyet kapları kullanılmalıdır. 5 galondan fazla cam kaplarda bulunan yanıcı sıvı uygun asit taşıma kovaası ve taşıma arabası yoksa yalnız yük asansöründe taşınmalıdır [22].

Aşındırıcılar veya oksitleyici kimyasallar cam taşıma kaplarında taşınmalı ayrıca ikinci bir dış kaba veya asit taşıma kovaasına yerleştirilmelidir. Birbiri ile uyumsuz kimyasal maddeler, orjinal kaplarında olmadıkları ve fiziksel olarak ayrıldıkları sürece aynı arabada taşınmamalıdır. Su ile temas ettiğinde tehlike oluşturan kimyasallar, toksik özellik taşıyan kimyasallar ile kendiliğinden yanabilen kimyasalların taşınması esnasında orjinal kapları kullanılmalıdır. Bahse konu kimyasallar açılması halinde ayrıca ikinci bir dış kaba veya asit taşıma kovaasına yerleştirilmelidir [22].

7. KİMYASAL ATIKLARIN BERTARAFI (DISPOSAL OF CHEMICAL WASTE)

Kimyasal atıkların yürürlükteki mevzuatlarda belirtilen usul ve esaslara uygun olarak güvenli bir şekilde yönetilmesi yasal bir zorunluluktur. Öncelikle atık oluşumuna mani olunması, oluşumun kaynağında azaltılması, mümkünse tekrar kullanılması, atığın türleri ve özellikleri dikkate alınarak gruplara ayrılması, her bir grubun ayrı ayrı biriktirilip toplanması ve belirlenen geçici depolama tesisinde depolanması, nakliyesi, geri dönüşümü ve geri kazanılması, bertarafının yapılması, bertarafından kaynaklanabilecek olumsuz etkilerin takip edilmesi, kontrol ve denetimi işlemlerinin tamamı atık yönetimini oluşturur [23].

Atık minimizasyonu atık miktarının azaltılması veya kaynağında geri kazanılması ile gerçekleştirilir. Kimyasal maddelerin gereğinden fazla bulundurulması atık miktarının artmasına neden olmasının yanı sıra iş kazalarının ve meslek hastalıklarının da artmasına neden olabilir. Atık minimizasyonunun sağlanması için olabildiğince az atık üretecek kimyasal maddeler kullanılmalı, daha az atık oluşturan iş ekipmanları, üretim yöntemleri ve süreçler tercih edilmelidir [24].

Birimlerde kimyasallardan kaynaklanan atık miktarını azaltacak satın alma yöntemleri

belirlenerek uygulanmalı, ihtiyaç duyulan miktardan fazla kimyasal madde satın alınmamalıdır. Tehlikeli atık oluşturma potansiyeli bulunan kimyasal maddeler tespit edilerek bunların yerine aynı faaliyetlerde kullanılması mümkün tehlikesi daha az kimyasal maddelerin satın alınması sağlanmalıdır. Tehlikeli atık oluşturma potansiyeli olmasına rağmen ikamesi mümkün olmayan kimyasallar ihtiyaç miktarı kadar satın alınmalıdır [24].

Kullanılan her bir kimyasal madde için envanter kaydı oluşturulmalı ve envanter kayıtları dönemsel olarak kontrol edilerek gereksiz kullanımlar belirlenmelidir. Birimlerde atık yönetimi planı doğrultusunda işletme kontrolü yapılmalıdır. Oluşan atıklardan geri kazanım ve geri dönüşümün uygulanabilecek olan atıklar tespit edilmelidir. Atık oluşumuna neden olan süreçler değerlendirilerek süreç kapsamında atık oluşturan işlemler yerine daha az atık oluşturan işlemler uygulanmalıdır. Cihazlarda kullanılan kimyasal maddelerin yeniden kullanım olanağı araştırılmalıdır. Fazla atık oluşturan cihazlar yerine varsa daha az atık oluşturan cihazlar kullanılmalıdır [24].

7.1. Atık Üreticisinin ve Atık Sahibinin Yükümlülükleri (Responsibility of Waste Ownership and Producer)

Atık sahibi ve üreticisi atık üretimini minimum seviyeye düşürmek için gerekli önlemleri almalıdır. Atık üretimini önlemek ve azaltmak için yükümlü olduğu atık yönetim planını hazırlamalıdır. Atık sahibi ve üreticisi atık yönetim planına göre tedbir almasına karşın oluşan atıkların kaydını tutarak, uygun ambalajlama ve etiketleme yapmalıdır. Oluşan atıkları Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğünden izin alarak oluşturacağı depoda ayrı ayrı toplayarak geçici olarak depolamalıdır. Geçici depoda biriken atıkları dönemsel olarak izin ve çevre lisansı almış atık işleme tesislerine göndermelidir. Atık yönetiminde görevli ve sorumlu olan çalışanların eğitilmelerini sağlamalıdır. Çalışanların iş kazası ve meslek hastalığına maruz kalmamaları için gerekli sağlık ve güvenlik önlemlerini almalı ve denetlemelidir. Depolama esnasında kaza ve olay meydana geldiğinde olay yerini en geç bir ay içinde eski haline getirilmelidir. Kaza sonrası kaza yerinin iyileştirilmesine ilişkin bilgileri içeren raporu Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğüne 3 iş günü içinde göndermelidir. Atık beyan formunu düzenleyip onaylamalı ve beş yıl boyunca bir

nüshasını saklamalıdır. Atığın bertarafının sağlanmasına yönelik gerçekleştirilen tüm işlemlerin maliyetini karşılamalıdır [23].

7.2. Atığın Tehlikelilik Durumu ve Laboratuvar Atıklarının Sınıflandırılması (Danger Status of Waste and Classification of Laboratory Wastes)

Kimyasal ve fiziksel, özellikleri nedeniyle çevreye veya insan sağlığına zararlı etkisi olan, kimyasal bir işlem uygulandığında, depolandığında, taşındığında reaksiyon sonucu patlayan ve yanıcı olabilen katı veya sıvı atıklar tehlikeli atıktır [25]. Tehlikeli atıklar Atık Yönetimi Yönetmeliğinde bulunan atık listesinde (*) ile işaretlenmiştir [23]. Laboratuvarlarda oluşabilecek tehlikeli atıklar kontamine atık, kontamine ambalaj, laboratuvar kimyasalları ve boş basınçlı kaplardır. Laboratuvarlarda ayrıca çeşitli malzeme alımları ve bireysel kullanımlar sonucu ortaya çıkan plastik, kâğıt, cam, metal ve ahşap esaslı ambalaj malzemelerinden oluşan tehlikesiz atıklar da oluşur [25].

Laboratuvarda kullanılan eldiven, maske, filtre, koruyucu önlük, temizleme bezleri gibi malzemelerin tehlikeli kimyasal maddelerle kirlenmesi ile oluşan atıklar kontamine atıklardır. Tehlikeli kimyasal maddelerle kirlenmiş ve tehlikeli maddelerin kalıntılarını içeren ambalajlar kontamine ambalaj atıklarıdır. Son kullanma tarihi geçmiş, tehlikeli maddeler içeren kimyasallar veya kimyasal karışımlarının atıkları laboratuvar kimyasallarıdır. Kullanım sonucu boşalmış katı yapılı metalik tehlikeli ambalajlar boş basınçlı kaplardır [25].

7.3. Atık Bertaraf Yöntemleri ve Geri Kazanım/Dönüşüm İşlemleri (Waste Disposal Methods and Recycling Operations)

Bertaraf, Atık Yönetimi Yönetmeliğinde yer alan derine enjeksiyon, yüzey doldurma, yakma, sürekli depolama gibi yöntemlerden herhangi birinin veya birkaçının bir arada uygulanmasıdır [23]. Geri kazanım; piyasada kullanılan maddelerin yerine kullanmak amacı ile oluşan atıkların yararlı bir amaç için kullanıma hazır hale getirilmesi amacıyla Atık Yönetimi Yönetmeliği Ek-2/B'de listelenen işlemlerin gerçekleştirilmesidir. Oluşan atık maddelerin işleme tabii tutularak atık oluşumundan önceki ile

aynı veya farklı ürün, malzeme veya maddeye dönüştürüldüğü geri kazanım işlemi ise geri dönüşümdür. Atıkların yakıt olarak kullanılması, enerji geri kazanımı ve dolgu işleminde kullanılmak üzere işlenmesi geri dönüşüm değildir [23].

Sağlık ve çevre için zararlı olan, tehlikeli madde içeren atıkların ve asbestin geri dönüştürülmesi ve tekrar kullanımı yasaktır. Bu atıklar ilgili yönetmeliklere uygun olarak bertaraf edilmelidir [26].

7.4. Laboratuvar Atıklarında Dikkat Edilecek Hususlar (Aspects to be Aware of Laboratory Wastes)

Laboratuvarlarda atık minimizasyonu uygulanmasına rağmen çalışmalar sonrası kimyasal atık oluşacaktır. Kimyasalın miktarının az olması kimyasallardan kaynaklanan risk etmenlerinin etkisini azaltmayacaktır. Bu nedenle laboratuvarlarda oluşan atıklar için aşağıda sıralanan önlemlerin alınması gereklidir.

Laboratuvarlarda oluşan atıklar diğer atıklarla karışmayacak şekilde kaynağında ayrı ayrı toplanmalıdır. Kontamine atıklar kontamine atık kutusunda, plastik, tekstil ve kâğıt içerikli malzemelerden oluşan atıklar kırmızı plastik torbalarda, laboratuvarlarda kullanılan beher, tüp, saklama kabı gibi camlardan kaynaklanan atıklar kontamine cam atık kutusunda, neşter, şırınga iğnesi gibi delici, kesici metal atıkları kesici, delici atık kutusunda, kontamine ambalaj atıkları kontamine ambalaj konteynirinde toplanır. Laboratuvarlarda kullanılmış katı kimyasallar sarı renkli plastik torbalarda, sıvı laboratuvar kimyasalları ağız sıkıca kapatılmış kaplarda, boş basınçlı kaplar belirlenmiş atık kutularında biriktirilir. Cam malzeme kırıkları kapalı kapağı olan kırık cam kutularına atılmalıdır [25].

Laboratuvarlarda atık kutularının konulacağı atık toplama alanı belirlenmelidir. Atık toplama alanında kullanılan atık kutuları sızdırmaz özellikte ve sağlam olmalı, kapakları sürekli kapalı tutulmalıdır. Atık toplama alanının temizliğine dikkat edilmelidir. Atık kutuları bulaşma ve kirlenmeye neden olmamalıdır. Her bir atık kutusuna atık etiketi yapıştırılmalıdır. Atık etiketinde atık adı ve kodu yazılmalıdır. Organik çözücü atıkların toplanmasında polietilen kaplar, sulu atıkların toplanmasında plastik kaplar

kullanılmalı, organik çözücü atıklarının toplandığı cam şişeler en fazla 5 litre, polietilen kaplar en fazla 10 litre hacminde olmalıdır [18].

Deney esnasında kullanılan civa ayrı bir şişede toplanarak, tekrar kullanılmalıdır. Ağır metal tuzları ve ağır metal tuz çözeltileri özel atık madde kaplarında toplanmalıdır. Filtrasyon katıları ile kromotografi kolon dolgu maddeleri ve plakaları ayrı kapta toplanmalıdır. Deney yaparken kirlenen vakum pompası ile ısıtma banyosu yağları ayrı olarak toplanarak saklanmalıdır. Kanserojen özellik taşıyan kromik asit cam laboratuvar malzemelerinin temizlemesi işleminde kullanılmamalıdır. Cam laboratuvar malzemelerinin temizlemesinde kromik asit yerine alkolle hazırlanmış kuvvetli potasyum hidroksit çözeltisi kullanılabilir. Kromik asit çözeltisinin kullanılması halinde oluşan atık şişede saklanmalıdır. Atıkların biriktirmesi esnasında sağlığa zararlı gazların açığa çıkma ihtimali varsa biriktirme işlemleri çeker ocak içinde yapılmalıdır [18].

Mümkün olduğunca atıklar fazla birikmeden zararsız hale getirilmelidir. Bunun için deneyimli elemanlar nötralizasyon işlemi uygulayabilir. Nötralizasyon esnasında reaksiyon oluşmasına dikkat edilmeli, nötralizasyon az miktar madde ile yeterli büyüklükte kaplar kullanılarak yapılmalıdır. Atıklarda peroksit olup olmadığı belirlenmelidir. Halojenli ve halojensiz solventler bir arada saklanmamalıdır. Ancak çok az miktarda halojensiz solvent zaruri hallerde halojenli solventlerle bir arada depolanabilir. Merkaptanlar ve nitrillerin sodyum hipoklorit çözeltisine karıştırılıp oksitlenmesi sağlanmalı, işlem sonrası oksitleyici madde tiyosülfatla nötralize edilip ayrı kapta saklanmalıdır. Seyreltik hidrojen sülfid çözeltisiyle reaksiyona sokulan suda çözünen aldehitler bisülfidlere dönüştürülerek organik çözücü kabına alınmalıdır. Siyanürler toksik olmaları nedeniyle pH 10-11 değerinde hidrojen peroksit ile daha az toksik olan siyanata dönüştürülür. İşlem sonrası pH 8-9 değerinde oksidantın fazlası eklenerek siyanatlar zararsız olan karbon dioksit ve azot gazı haline getirilerek atık kabında toplanır [18].

Sodyum tiyosülfat ve iyotla reaksiyona sokulan asitler, azota dönüştürülür. İnorganik peroksitler ve oksidantlar asidik sodyum tiyosülfat çözeltisi kullanılarak zararsız hale getirilerek katı atık kabında muhafaza edilir. Çok toksik olan beyaz

fosfor dışarıya ısı vererek pentaoksidedönüşeceğinden su içinde saklanmalı ve dikkatli kullanılmalıdır. Beyaz fosfor imha edilirken soğuk su ile karıştırılarak seyreltilmeli ve sodyum hidroksit çözeltisiyle nötralize edilmelidir. Kırmızı fosfor oksitleyici maddelerle temas ettirilmemelidir. Malzeme güvenlik bilgi formlarında birbiri ile tepkime veren kimyasallar belirtilmekte olup tepkimeye giren kimyasal maddeler birbirinden ayrı saklanmalıdır [18].

8. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

Kimya bilimi; beslenme, barınma, ısınma, giyinme, sağlık, hijyen başta olmak üzere pek çok alanda insanlığa hizmet etmektedir. Kimya endüstrisinde üretilen kimyasal ürünler günlük hayatımıza yapmış olduğu katkılarla yaşam standardımızı her geçen gün arttırmaktadır. Kimyasal ürünlerin kullanımı ile yaşantımız kolaylaşırken bir yandan da kimyasal maddelere maruziyet sonucu sağlığımız olumsuz etkilenmekte ve ekosistem bozulmaktadır. Kullandığımız kimyasal maddeler hakkında yeterince bilgi sahibi olmak, kimyasallardan kaynaklanan risk etmenlerine karşı önlem almamızı kolaylaştıracaktır. Bu nedenle özellikle günlük yaşantımızda kullandığımız kimyasallardan kaynaklanan tehlikelerin etiketlerinde açık olarak yazılmasında büyük yarar vardır.

Kimyasal maddeler, uygun koşullarda depolanmadığında büyük risk oluşturur. Bu nedenle, depolama koşulları belirlenirken, kimyasalların özellikleri, ne tür tehlike ve risk oluşturdukları, güvenli depolama için nelere dikkat edilmesi gerektiğini bilmek büyük önem taşır. Tasarım aşamasından başlayarak büyük özen gösterilmesi gereken kimyasal depolara maalesef ülkemizde gereken önem verilmemektedir. Kimyasal malzeme depolarında yangına karşı alınması gereken önlemler ulusal mevzuatımızda yer alırken patlama, sağlık ve çevresel risklere karşı alınması gereken önlemlerin yer aldığı yeterli düzeyde mevzuatımız yoktur. İlgili bakanlıklar tarafından yasal düzenlemelerin yapılarak uygulanmasına ihtiyaç vardır.

Kimyasalların doğru olarak sınıflandırılması, etiketlenmesi, depolanması, kullanılması, bertarafı, taşınması artık uluslararası bir sorundur.



Bahse konu sorunların çözüme kavuşturulması için ulusal mevzuatımızı bir an önce uluslararası mevzuata uyumlu hale getirmemiz, mevzuatların uygulama durumunun denetlenmesi gerekmektedir.

Orta ve küçük ölçekli işletmelerde kullanılan kimyasal madde miktarı az da olsa kimyasalların depolanması, taşınması, bertarafının maliyetleri yüksek olduğundan küçük işletme sahiplerinin riskleri önemsemedikleri veya riskleri en ucuz maliyetlerle önlemeye çalıştıkları görülmektedir. Kullanılan veya depolanan kimyasal madde miktarı ne olursa olsun uyulması gereken kurallar genellikle aynıdır. Orta ve küçük ölçekli işletmelerde kimyasalların depolanması, taşınması, bertarafı için yapılan harcamalar için düşük faizli krediler verilmesi veya vergi indirimi uygulanması uygun olacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H.Ünal, Kimyasal Risklerin Sınıflandırılması ve İşaretlenmesi, İşaret Sistemleri, İstanbul: T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Başkanlığı, 2011.
- [2] http://fen.ege.edu.tr/blm_kimya/index.php/tr/akademik/anabilim-dallari/fizikokimya, 2016.
- [3] N. Vural, Toksikoloji, Ankara Üniversitesi Eczacılık Fakültesi Yayınları No: 73, pp 1, Ankara, 2005.
- [4] Ekotoksikoloji, <http://biyoloji.trakya.edu.tr/pages/ekotoksikoloji#.WB3dT9KLSt8>, 2016.
- [5] Tehlikeli Maddelerin Karayoluyla Taşınması Hakkında Yönetmelik, T.C.Resmi Gazete, 28801, 24 Ekim 2013.
- [6] Tehlikeli Malların Karayolu İle Uluslararası Taşımacılığına İlişkin Avrupa Anlaşması Cilt I, Birleşmiş Milletler, pp103, Ocak 2013.
- [7] Information System on International Labour Standards, C170 - Chemicals Convention, 1990.
- [8] Information System on International Labour Standards, R177- Chemicals Recommendation, 1990.

- [9] I. Putte; F. Affourtit; Tercüme eden: Çevre ve Orman Bakanlığı, Çevre Yönetimi Genel Müdürlüğü, Kimyasallar Yönetimi Dairesi Başkanlığı & İMMİB, CLP Tüzüğü Rehberlerinin Kullanımı, Ankara.
- [10] Maddelerin ve Karışımların Sınıflandırılması, Etiketlenmesi ve Ambalajlanması Hakkında Yönetmelik, T.C.Resmi Gazete, 28848 (Mükerrer), 11 Aralık 2013.
- [11] Zararlı Maddeler ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik, T.C.Resmi Gazete, 29204, 13 Aralık 2014.
- [12] Çalışma Yaşamında Sağlık Gözetimi Rehberi, http://www3.csgb.gov.tr/csgbPortal/ShowProperty/WLP%20Repository/isggm/dosyalar/isgip_saglik_gozetim, 2016.
- [13] United Nations, ST/SG/AC. 10/30/Rev.4, New York and Geneva, Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS), 2011.
- [14] T.C. Millî Eğitim Bakanlığı, Ulaştırma Hizmetleri Alanı Tehlikeli Madde Taşımacılığı, Ankara, 2011.
- [15] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, SEA Yönetmeliği İçin Etiketleme ve Ambalajlama Rehberi, Ankara, 2013.
- [16] M.Bağcı, Ambalajlanmış Tehlikeli Ürünleri Karışık Depolama Rehberi, Türkiye Kimya Sanayicileri Derneği, İstanbul.
- [17] United Nations, ST/SG/AC.10/1/Rev.14 (Vol.I), New York and Geneva, Recommendations on the transport of dangerous goods, 2005.
- [18] E. Kürkçü, Ç. Arslan Tatar, E.Babaarslan, Ö. İlik, F. Şentürk, B. Tiryaki, C. Yaşaroğlu, Ankara, Kimyasalların Güvenli Depolanması, T.C Çalışma Ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü İş Sağlığı ve Güvenliği Merkezi Müdürlüğü, 2011.
- [19] A. Kürkçü, Ş. Biçer, İ. Sarıöz Ağca, D. Tayfur, Kimyasalların Güvenli Depolanması Rehberi, İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü İş Sağlığı ve Güvenliği Araştırma ve Geliştirme Enstitüsü Başkanlığı, 2013.
- [20] <https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/standardara.aspx>, 2016.
- [21] Annabelle Guilleux, National Research and Safety Institute, Chemical Storage, https://oshwiki.eu/wiki/Chemical_storage, 2016.
- [22] Environmental Health& Radiation Safety, <http://www.ehrs.upenn.edu/programs/labsafety/chp/storage.html>, 2016.
- [23] Atık Yönetimi Yönetmeliği, T.C.Resmi Gazete, 29314, 2 Nisan 2015.
- [24] T.C.Anadolu Üniversitesi, Eskişehir Atık Yönetimi El Kitabı, 2012.
- [25] <http://www.aczkimya.com/ACZ/laboratuvar-atiklarinin-belirlenmesi-ve-siniflandirilmesi.html>, 2016.
- [26] N. Kılıç, Kentsel Dönüşümde Geri Dönüşüm Atağı AR&GE Bülten Aralık, İzmir Ticaret Odası, İzmir, 2012.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 18-07-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.329234	
	<u>Kabul/Accepted</u> 18-09-2017	<u>Online Access</u>	

Remazol Brilliant Blue R (RBBR) boyarmaddesinin düşük maliyetli bir adsorban olan sigara külü ile giderimi

Rabia Köklü^{*1}, Çiğdem Özer¹

ÖZ

Boyarmaddelerin geniş kullanımı sebebiyle ortaya çıkan boyalı atıksuların artırılması önemli bir çevre sorunudur. Sigara kullanımı da günümüzde birçok kişinin sahip olduğu zararlı bir alışkanlıktır. Sigara kullanımı sırasında ortaya çıkan atık küllere bir kullanım alanı yaratmak ve boyarmaddelerin adsorpsiyon yöntemi ile gideriminde yeni, alternatif ve düşük maliyetli bir adsorban ortaya koymak amacıyla yola çıkılan bu çalışmada, sigara külünün Remazol Brilliant Blue R (RBBR) boyarmaddesini adsorplama yeteneği araştırılmıştır. Bu amaçla, RBBR boyarmaddesinin maliyetsiz bir adsorban olan sigara külü üzerine adsorpsiyon şartları pH, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu, karıştırma süresi ve adsorbent dozuna bağlı olarak incelenmiş ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi 178,57 mg/g olarak belirlenmiştir. Bunun yanında deneysel verilerin izoterm ve kinetik modellere uygunluğu araştırılmış ve bu modellere ait parametreler hesaplanmıştır. RBBR boyarmaddesinin sigara külü ile adsorpsiyonunun Langmiur izotermi ile daha iyi ifade edildiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: RBBR, adsorpsiyon, sigara külü, izoterm ve kinetik

Removal of Remazol Brilliant Blue R (RBBR) dyes with a low cost adsorbent, cigarette ash

ABSTRACT

The treatment of wastewaters contaminated with dye from the widespread use of dyestuff is an important environmental issue. Smoking is also a harmful habit that many people have nowadays. This study aimed to investigate the Remazol Brilliant Blue R (RBBR) adsorb ability of the cigarette ash to gain a use area for waste ash generated during smoking and to introduce a new, alternative and low cost adsorbent in the removal of dyestuff by adsorption method. For this purpose, the conditions of RBBR adsorption on the cigarette ash, which is a costless adsorbent, were investigated according to pH, initial dyestuff concentration, contact time and adsorbent dose and maximum adsorption capacity was determined as 178,57 mg/g. In addition, the suitability of experimental data with isotherm and kinetic models was analyzed and the parameters of these models were calculated. Adsorption of RBBR dye with cigarette ash has been shown to be better expressed by Langmuir isotherm.

Keywords: RBBR, adsorption, cigarette ash, isotherm and kinetic

¹ Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü Esentepe Kampüsü, 54187, Sakarya Türkiye
cozer@sakarya.edu.tr *rkoklu@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tekstil, kağıt, gıda ve ilaç gibi endüstriyel sektörlerde çeşitli boyarmaddeler kullanılmakta ve bu kullanımlardan çevreye ve insan sağlığına zararlı etkiler ortaya çıkmaktadır. Bu etkilerden korunmak için de uygun arıtma teknolojilerine ihtiyaç duyulmaktadır [1].

Endüstriyel atıksulardan renk gideriminde kullanılan geleneksel uygulamalar; iyon değişimi, adsorpsiyon, membran teknolojileri, elektrodializ, filtrasyon, çöktürme, koagülasyon, oksidasyon olarak sıralanabilir [2], [3]. Bu yöntemler arasında adsorpsiyon, yüksek verimlilik, tasarımın sadeliği, kullanım kolaylığı ve çeşitli boyalar için uygunluğu nedeniyle atık suların içerdiği tehlikeli inorganik / organik kirleticileri azaltmak için kullanılan ileri atık su arıtımının en etkin metotlarından biridir [4], [5].

Adsorpsiyon tekniğinin etkinliğini belirleyen önemli unsurlardan birinin kullanılan adsorbent olduğu bilinmektedir. Bu nedenle en düşük maliyetli ve en etkin adsorbenti belirleyebilmek amacıyla doğal malzemelerle çok sayıda çalışma yapılmıştır. Örneğin; çam kozalağı, çay atığı, pirinç kabuğu, çam yaprağı, elma kabuğu, mısır püskülü, muz, kahve, portakal kabuğu, tütün kökü külü [5], yaprak tozu, palmye külü, buğday kepeği, okaliptüs kabuğu, mısır atıkları, saman [6], palmye yağı, badem kabuğu, fıstık gövdesinin [7] yanısıra karbon/aktif karbon bazlı ve kül temelli [8] diğer adsorbanlar da çeşitli boyarmaddelerin giderimi için kullanılmıştır.

Dünyada 100.000'den fazla boya üretimi yapılmaktadır. Yaklaşık olarak, sentetik boyaların % 10-15'i atık olarak çevreye doğrudan bırakılmaktadır [9]. Remazol Brilliant Blue R, tekstil endüstrisinde en çok kullanılan sentetik boyalardan biridir. RBBR, genellikle toksik ve reaktif özelliklere sahip önemli bir sınıfı temsil eden, anyonik bir boya, kimyasal bozunmaya karşı dirençli organik bir kirleticidir [7], [9].

Bu çalışmada, RBBR boyarmaddesinin maliyetsiz bir adsorban olan sigara külü ile adsorpsiyon şartları pH, başlangıç boyarmadde konsantrasyonu, karıştırma süresi ve adsorbent dozuna bağlı olarak incelenmiş ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi belirlenmiştir. Bunun yanında deneysel verilerin izoterm ve kinetik

modellere uygunluğu araştırılmış ve bu modellere ait parametreler hesaplanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Adsorbent Olarak Sigara Külü (Cigarette Ash as Adsorbent)

Çalışmada adsorbent olarak kullanılan sigara külü, sigara odalarından kontrollü bir şekilde toplanmıştır. Toplanan küller, 2 L saf su ile 12 saat karıştırılmış ve bu işlem 3 defa tekrar edilmiştir. Safsızlığından arındırılan küller 60 °C'de 24 saat etüvde kurutulmuş ve kullanıma hazır haldeki kül desikatörde saklanmıştır.

2.2. Kullanılan Cihaz ve Kimyasallar (Instruments and Chemicals)

Kurutma işlemleri için etüv (Binder FD 23), pH ayarlaması için pH metre (WTW pH 720), karıştırma işlemleri için orbital çalkalayıcı (KS4000i, IKA Werke GmbH, Germany), boyarmadde konsantrasyonunun belirlenmesi için spektrofotometre (Hitachi, U-1800, Tokyo, Japan) kullanılmıştır.

pH ayarlaması için sodyum hidroksit (NaOH), hidroklorik asit (HCl) (Merck KGaA Darmstadt, Germany) kullanılmıştır. Boyar madde olarak molekül ağırlığı 626.54 g/mol ve kimyasal formülü $C_{22}H_{16}N_2Na_2O_{11}S_3$ olan anyonik boyarmadde RBBR (Sigma-Aldrich, Germany) kullanılmıştır.

2.3. Deneysel Çalışmalar (Experimental Studies)

Deneylerde kullanılan RBBR için 1000 mg/L stok çözelti hazırlanmıştır. Çalışma çözeltileri stok çözeltinin gerekli miktarlarda seyreltilmesi ile elde edilmiştir.

Sulu çözeltilerden boyarmadde giderimi için 2-9 aralığında değişen pH, 25-350 mg/L aralığında boyarmadde konsantrasyonu, 15-360 dk aralığında temas süresi ve 50-200 mg aralığında adsorbent dozu çalışmaları yapılmıştır. Çözeltide kalan boyarmadde konsantrasyonu 593 nm dalga boyunda ölçülmüş ve çözelti ortamından uzaklaştırılan boyar madde miktarlarının hesaplanmasında aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$Q_e = (C_0 - C_e)V/W \quad (1)$$

Burada;

Q_e : Adsorbentin birim ağırlığı başına adsorplanan RBBR miktarı (mg/g),

C_0 : RBBR başlangıç konsantrasyonu (mg/L),

C_e : Adsorpsiyon sonrası çözeltide kalan RBBR konsantrasyonu (mg/L),

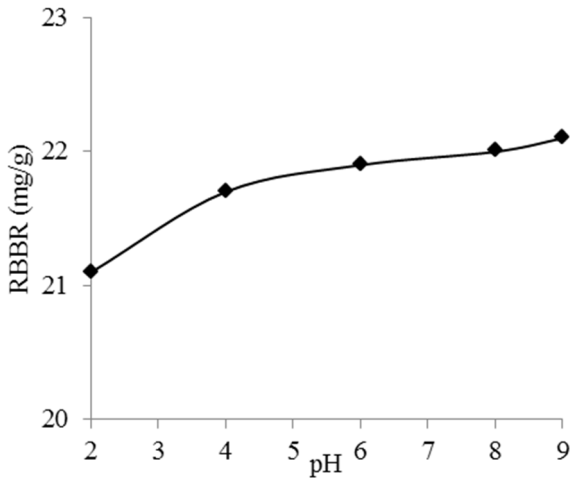
V : Kullanılan çözelti hacmi (mL),

W : Sigara külünün miktarı (mg) dir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. RBBR Giderimine pH Etkisi (pH Effect on RBBR Removal)

Sulu çözeltiden boyarmadde gideriminde optimum pH'ı belirlemek üzere sulu çözeltinin (100 mg/L) pH'ı 2,4,6,8,9'a ayarlanmıştır ve 200 mg sigara külü eklenmiştir. 180 dakika boyunca 150 rpm hızında karıştırılmıştır.



Şekil 1. RBBR giderimine pH etkisi (pH effect on RBBR removal)

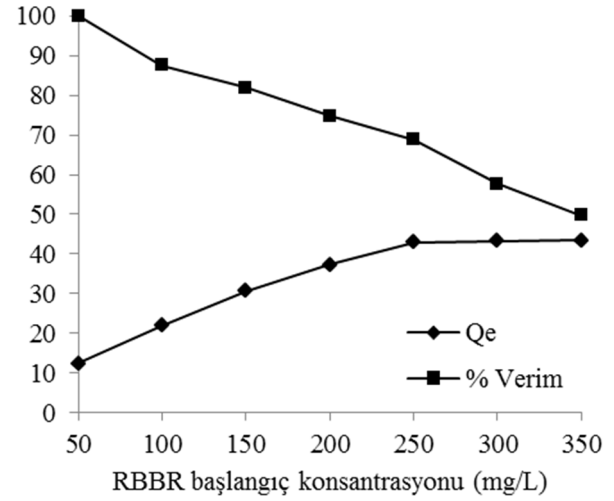
Şekil 1 de görüldüğü üzere genel olarak pH artışına bağlı olarak sigara külü üzerine RBBR adsorplanma miktarı önemsiz bir artış göstermiştir. pH 2 değerinde 21.1 mg/g olan adsorplanma miktarı, pH 9 olduğunda 22.1 mg/g değerine yükselmiştir. RBBR anyonik (asidik) boyalar grubunda yer almakta ve sulu çözeltilerinde en fazla sülfonik (-SO₃) grup içermektedirler. Bu sülfonik gruplar sulu fazda negatif yük taşırlar. Yüksek pH değerlerinde artış gösteren adsorplanma miktarı, boya yapısında negatif yük taşıyan sülfonik gruplar ile pozitif yüklendiği düşünülen adsorban yüzeyinin

elektrostatik etkileşiminden kaynaklanacağı gibi pH artışına bağlı olarak ortamda azalan H⁺ iyonu rekabetinin azalmasından da kaynaklanabilir. pH arttıkça adsorpsiyon miktarında gözlenen artış bu şekilde açıklanabilir [10]–[12].

Orijinal pH değeri (6.0) ve denenen maksimum pH değeri (9.0) arasında RBBR adsorplanma miktarı açısından önemsenecek bir fark gözlenmemesi sebebi ile, bundan sonraki çalışmalar orijinal pH değerinde sürdürülmüştür.

3.2. RBBR Başlangıç Konsantrasyonunun Etkisi (Effect of Initial RBBR Concentration)

Boyar madde başlangıç konsantrasyonu için gerekli seyreltmeler yapılarak konsantrasyonu 25-350 mg/L aralığında değişen çözeltiler hazırlanmıştır. Her biri için 200 mg sigara külü tartılıp çözeltilere ilave edilmiştir. Daha sonra 180 dk boyunca 150 rpm'de çalkalanmıştır.

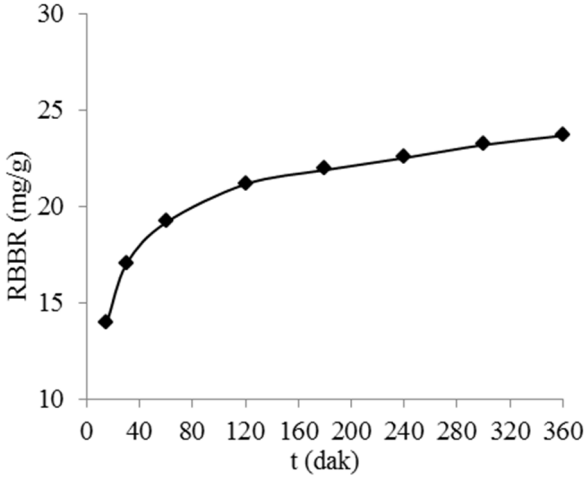


Şekil 2. RBBR başlangıç konsantrasyonunun etkisi (Effect of initial RBBR concentration)

Şekil 2'de gösterildiği üzere, başlangıç RBBR konsantrasyonunun 50 ila 250 mg/L arasında artması, adsorpsiyon miktarında önemli bir artışa neden olurken, 250 ila 350 mg/L aralığında değiştiğinde ise adsorpsiyon miktarı neredeyse değişmemektedir. Düşük başlangıç konsantrasyonlarında tüm RBBR molekülleri, adsorptif alanlara adsorbe edilmiş ve RBBR'nin daha yüksek verimde (%100-%68) adsorplandığı görülmüştür. Daha yüksek boya konsantrasyonlarında daha düşük uzaklaştırma yüzdesi, adsorbanın adsorpsiyon alanlarının doymuşluğundan kaynaklanmaktadır [13]

3.3. Temas Süresi Etkisi (Effect of Contact Time)

Sigara külü kullanılarak adsorpsiyonla renk gideriminde optimum karıştırma süresini belirlemek üzere 100 mg/L konsantrasyonundaki boya çözeltilerine 200 mg kül ilave edilmiştir. 150 rpm karıştırma hızında değişen sürelerde (15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360 dk) karıştırılmış, çözeltide kalan RBBR konsantrasyonu spektrofotometrede ölçülmüştür.

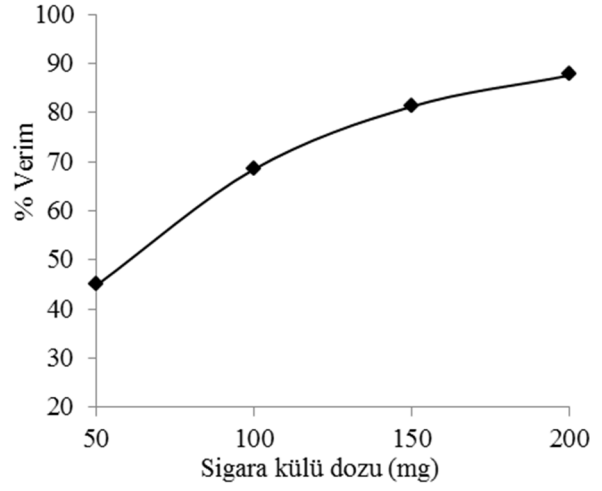


Şekil 3. Temas süresi etkisi (Effect of contact time)

Sigara külü ile RBBR giderimi 180 dakikaya kadar olan temas süresi ile hızla artmış ve 180 dakikadan sonraki artışlar önemsenmeyecek kadar azalmıştır. Bu sonuç, ilk adsorpsiyon hızının, adsorpsiyon için kullanılan adsorbanın bol miktardaki boş alanlarına bağlı olduğunu ve daha sonra adsorpsiyon için aktif bölgelerin azalmışlığını göstermektedir [14], [15]. Ek olarak bu durum, adsorbanın yüzey özelliklerinin küresel düzgün yapıda değil ince kanalcıklar şeklinde olmasından da kaynaklanıyor olabilir.

3.4. Adsorbent Dozu Etkisi (Effect of Adsorbent Dose)

Optimum sigara külü dozunu belirleyebilmek amacıyla 100 mg/L konsantrasyonundaki boya çözeltilerine 50, 100, 150, 200 mg kül ilave edilmiş ve 180 dk 150 rpm hızla karıştırılmıştır.



Şekil 4. Adsorbent dozunun adsorpsiyon verimine etkisi (Effect of adsorbent dose on adsorption yield)

Şekil 4, sigara külü dozu artışına bağlı olarak RBBR giderim veriminin arttığını göstermektedir. Artan yüzey alanı nedeniyle adsorbent dozu artırılarak adsorpsiyonda bir artış gözlemlenmiştir. Ancak adsorbent birim kütlesi için adsorbe edilen miktar azalmaktadır [16]. 50 mg sigara külü kullanıldığından 44,85 mg/g olan adsorplanma miktarı 200 mg sigara külü için 21,9 mg/g olarak bulunmuştur.

3.5. İzoterm ve Kinetik Çalışmaları (Isotherm and Kinetic Studies)

Boya giderimi için kullanılan adsorpsiyon sisteminin optimizasyonunda, denge verileri arasındaki en uygun korelasyonun oluşturulması önemlidir. RBBR boyar maddesinin sigara külü üzerine adsorpsiyon prosesinden elde edilen deneysel verilerin Langmuir (Denklem 2) ve Freundlich (Denklem 3) izoterm modelleri ile Pseudo birinci (Denklem 4) ve ikinci derece (Denklem 5) kinetik modelleri ile uygunlukları araştırılmıştır.

$$C_e/Q_e = C_e/Q_{mak} + \left(\frac{1}{K_L Q_{mak}} \right) \quad (2)$$

$$\text{Log} Q_e = \text{Log} K_F + n \text{Log} C_e \quad (3)$$

$$\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - k_1 t \quad (4)$$

$$\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{k_2 Q_e^2} + \frac{t}{Q_e} \quad (5)$$

Denklemlerde;

Q_e : Birim adsorban üzerine adsorplanan madde miktarını (mg/g),

C_e : Dengede, adsorplanmadan çözeltide kalan RBBR konsantrasyonunu (mg/L),

K_L : Langmuir izoterm modelinin sabitini,

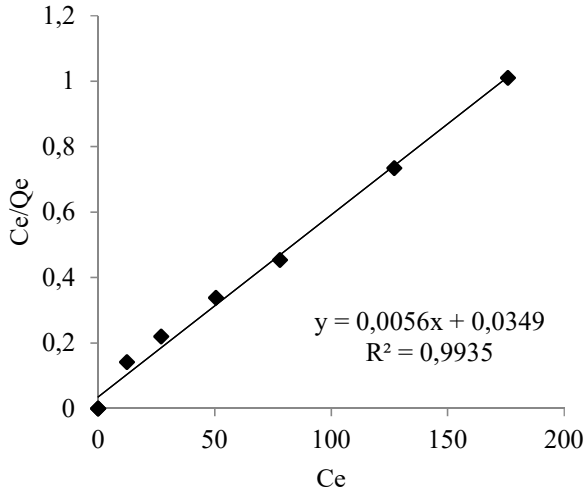
Q_{mak} : Maksimum adsorpsiyon kapasitesini (mg/g),

K_F ve n : Freundlich izoterm modelinin sabitlerini, k_1 ve k_2 ise sırasıyla pseudo birinci ve ikinci derece hız sabitlerini ifade etmektedir.

Şekil 5’de C_e ve C_e/Q_e arasında çizilen grafikteki doğrunun eğim noktasından Q_{mak} , kesim noktasından da K_L hesaplanmıştır [17]. RBBR boyarmaddesinin sigara külü ile adsorpsiyonu Langmuir izotermi ile daha iyi ifade edilmiştir ($R^2=0,9935$) ve maksimum adsorpsiyon kapasitesi 178,57 mg/g olarak bulunmuştur. Değişik adsorbanlar kullanılarak RBBR boyar maddesinin adsorpsiyonu çalışmaları incelenmiş ve maksimum adsorpsiyon kapasiteleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. RBBR maksimum adsorplanma kapasiteleri (Maksimum adsorption capacities for RBBR)

Kullanılan Adsorban	RBBR Q_{mak} (mg/g)	Referans
Aktif Karbon	33,47	[18]
Kemik tozu	20,60	[1]
Ananas yaprağı	9,66	[7]
Aktif çamur	9,38	[19]
Su kabağı	100,50	[20]
Bu çalışma	178,57	

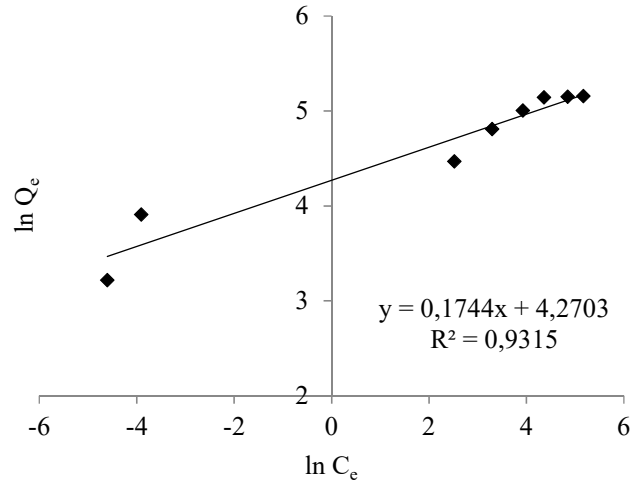


Şekil 5. Langmuir izoterm grafiği (Langmuir isotherm graph)

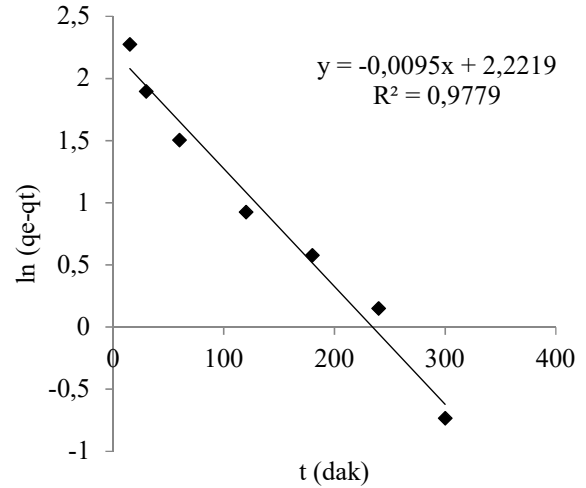
Şekil 6’da verilen Freundlich izoterm grafiğinde de doğrunun eğiminden $1/n$, kesim noktasından K_F

hesaplanmıştır [21]. Hesaplanan değerler Tablo 2’de verilmiştir.

RBBR’nin sigara külü üzerine adsorpsiyon kinetiği Pseudo birinci ve ikinci derece kinetik modelleri kullanılarak belirlenmiştir. Pseudo birinci derece model için $\ln (q_e - q_t)$ ile t arasında çizilen grafiğin (Şekil 7) kesim noktasından k_1 ve eğiminden Q_e değeri elde edilmiştir. Aynı şekilde, Pseudo ikinci mertebeden model için k_2 ve Q_e değerleri Şekil 8’de gösterilen grafiğin kesim noktası ve eğiminden hesaplanmıştır [22], [23].



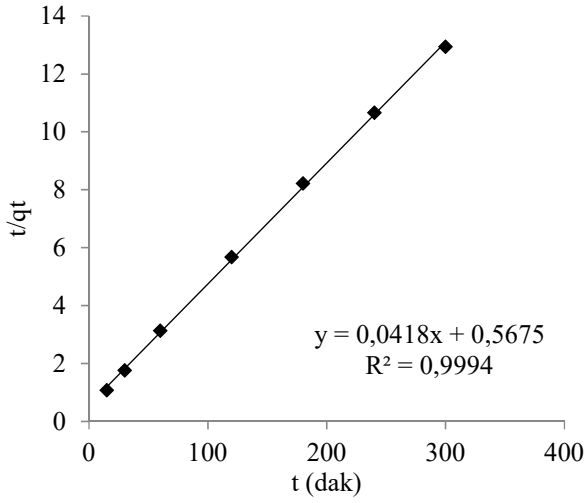
Şekil 6. Freundlich izoterm grafiği (Freundlich isotherm graph)



Şekil 7. Pseudo birinci derece kinetik grafiği (Pseudo first order kinetic chart)

Her iki kinetik modele ait Q_e değerleri Tablo 2’de verilmiştir. Deneysel olarak elde edilen Q_e (23,68 mg/g) değeri ile Pseudo ikinci derece denklemi ile elde edilen değer birbirine yakınlığı, bu prosesin kinetiğinin Pseudo ikinci derece denklemi ile ifade edilebildiğini göstermektedir. Grafikler üzerinde

gösterilen R^2 değerleri de bu sonucu desteklemektedir.



Şekil 8. Pseudo ikinci derece kinetik grafiği (Pseudo second order kinetic chart)

Tablo 2. Kullanılan izoterm ve kinetik modellere ait sabitler (Constants of used isotherm and kinetic models)

Langmuir		Freundlich	
Q_{mak} (mg/g)	K_L	K_F	n
178,57	0,16	71,54	5,70
Pseudo Birinci derece		Pseudo İkinci derece	
k_1	Q_c (mg/g)	k_2	Q_c (mg/g)
$9,50 \cdot 10^{-3}$	9,22	$4,51 \cdot 10^{-5}$	23,92



4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, RBBR boyarmaddesinin maliyetsiz bir adsorban olan sigara külü ile adsorbsiyon şartları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda maksimum RBBR giderimi için optimum pH değeri 6.0 ve karıştırma süresi 180 dakika olarak belirlenmiştir. Çalışmanın kinetik karakteri Pseudo ikinci derece modeli ile izoterm karakteri ise Langmuir modeli ile uyumlu bulunmuştur. Langmuir izoterm modeline bağlı olarak maksimum adsorbsiyon kapasitesi 178,57 mg/g olarak belirlenmiştir. Yüksek giderim kapasitesi ve maliyetsiz olması sebebi ile sigara külünün, sulu çözeltilerden boyar madde gideriminde etkili olduğu belirlenmiş, atıksulardan boyarmadde için de alternatif bir adsorban olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] K. C. Bedin, S. P. de Azevedo, P. K. T. Leandro, A. L. Cazetta, and V. C. Almeida, "Bone char prepared by CO₂ atmosphere: Preparation optimization and adsorption studies of Remazol Brilliant Blue R," *J. Clean. Prod.*, vol. 161, pp. 288–298, 2017.
- [2] K. Chinoune, K. Bentaleb, Z. Bouberka, A. Nadim, and U. Maschke, "Adsorption of reactive dyes from aqueous solution by dirty bentonite," *Appl. Clay Sci.*, vol. 123, pp. 64–75, 2016.
- [3] G. C. Upadhye and R. S. Yamgar, "Analytical study of agricultural waste as non-conventional low cost adsorbent removal of dyes from aqueous solutions," *Int. J. Chem. Stud.*, vol. 4, no. 1, pp. 128–133, 2016.
- [4] M. A. A. El-kawi, A. M. Hafez, I. G. A. Rashed, and E. E. Aboelnaga, "Removal of reactive blue 19 from aqueous solution using rice straw fly ash," *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 7, no. 3, pp. 1023–1036, 2016.
- [5] M. T. Yagub, T. K. Sen, S. Afroze, and H. M. Ang, "Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 209, pp. 172–184, 2014.
- [6] M. Dehvari, M. Ghaneian, A. Ebrahimi, B. Jamshidi, and M. Mootab, "Removal of reactive blue 19 dyes from textile wastewater by pomegranate seed powder: Isotherm and kinetic studies," *Int. J. Environ. Health Eng.*, vol. 5, no. 1, p. 5, 2016.
- [7] N. A. Rahmat, A. A. Ali, Salmiati, N. Hussain, M. S. Muhamad, R. A. Kristanti, and T. Hadibarata, "Removal of Remazol Brilliant Blue R from Aqueous Solution by Adsorption Using Pineapple Leaf Powder and Lime Peel Powder," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 227, no. 4, 2016.
- [8] R. K. Ghosh and D. D. Reddy, "Tobacco stem ash as an adsorbent for removal of methylene blue from aqueous solution: Equilibrium, kinetics, and mechanism of adsorption," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 224, no. 6, 2013.
- [9] E. Mourid, M. Lakraimi, E. El Khattabi, L. Benaziz, and M. Berraho, "Removal of Remazol Brilliant Blue R From Aqueous Solution by Adsorption Using a Calcined Layered Double Hydroxides [Zn₂-Al-CO

- 3],” *J. Mater. Environ. Sci.*, vol. 8, no. 3, pp. 921–930, 2017.
- [10] M. A. Moreira, K. J. Ciuf, V. Rives, M. A. Vicente, R. Trujillano, A. Gil, S. A. Korili, and E. H. De Faria, “Applied Clay Science Effect of chemical modification of palygorskite and sepiolite by 3-aminopropyltriethoxysilane on adsorption of cationic and anionic dyes,” vol. 135, pp. 394–404, 2017.
- [11] M. Wawrzekiewicz, P. Bartczak, and T. Jesionowski, “International Journal of Biological Macromolecules Enhanced removal of hazardous dye from aqueous solutions and real textile wastewater using bifunctional chitin / lignin biosorbent,” *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 99, pp. 754–764, 2017.
- [12] K. Z. Elwakeel, A. Ismail, and A. M. Morshidy, “Magnetic chitosan grafted with polymerized thiourea for remazol brilliant blue R recovery: Effects of uptake conditions,” *J. Dispers. Sci. Technol.*, vol. 38, no. 7, pp. 943–952, 2017.
- [13] A. Asfaram, M. Ghaedi, F. Yousefi, and M. Dastkhoo, “Ultrasonics Sonochemistry Experimental design and modeling of ultrasound assisted simultaneous adsorption of cationic dyes onto ZnS : Mn-NPs-AC from binary mixture,” *Ultrason. - Sonochemistry*, vol. 33, pp. 77–89, 2016.
- [14] T. Maneerung, J. Liew, Y. Dai, S. Kawi, C. Chong, and C. Wang, “Bioresource Technology Activated carbon derived from carbon residue from biomass gasification and its application for dye adsorption: Kinetics, isotherms and thermodynamic studies,” vol. 200, pp. 350–359, 2016.
- [15] D. Robati, M. Rajabi, O. Moradi, F. Naja, I. Tyagi, S. Agarwal, and V. Kumar, “Kinetics and thermodynamics of malachite green dye adsorption from aqueous solutions on graphene oxide and reduced graphene oxide,” vol. 214, pp. 259–263, 2016.
- [16] A. R. Omran, M. A. Baiee, S. A. Juda, J. M. Salman, and A. F. Alkaim, “Removal of Congo red dye from aqueous solution using a new adsorbent surface developed from aquatic plant (*Phragmites australis*),” vol. 9, no. 4, pp. 334–342, 2016.
- [17] C. Muthukumaran and V. Murugaiyan, “Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers Adsorption isotherms and kinetic studies of crystal violet dye removal from aqueous solution using surfactant modified magnetic nanoadsorbent,” vol. 63, pp. 354–362, 2016.
- [18] T. L. Silva, A. Ronix, O. Pezoti, L. S. Souza, P. K. T. Leandro, K. C. Bedin, K. K. Beltrame, A. L. Cazetta, and V. C. Almeida, “Mesoporous activated carbon from industrial laundry sewage sludge: Adsorption studies of reactive dye Remazol Brilliant Blue R,” *Chem. Eng. J.*, vol. 303, pp. 467–476, 2016.
- [19] D. Özçimen and T. Salan, “Uklanjanje reaktivne boje remazol brilliant blue R IZ vodenih rastvora adsorbentom NA bazi otpadnog mulja IZ anaerobne digestije,” *Chem. Ind. Chem. Eng. Q.*, vol. 22, no. 2, pp. 167–179, 2016.
- [20] X. Xie, X. Li, H. Luo, H. Lu, F. Chen, and W. Li, “The adsorption of reactive blue 19 dye onto cucurbit[8]uril and cucurbit[6]uril: An experimental and theoretical study,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 120, no. 17, pp. 4131–4142, 2016.
- [21] M. A. Tahir, H. Nawaz, and M. Iqbal, “Journal of Environmental Chemical Engineering Solar Red and Brittle Blue direct dyes adsorption onto Eucalyptus angophoroides bark: Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies,” *Biochem. Pharmacol.*, vol. 4, no. 2, pp. 2431–2439, 2016.
- [22] N. Khairuladli, A. Fisal, H. Mohdsukri, N. Khairunisa, and A. Ma, “Adsorption of Chemically Prepared Cocoa Nibs Based Activated Carbon Onto Methylene Blue: Equilibrium and Kinetic Studies,” vol. 1, no. 1, pp. 15–18.
- [23] S. Mohammadreza, S. Kordmirza, and G. McKay, “Methylene blue adsorption via maize silk powder: Kinetic, equilibrium, thermodynamic studies and,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 106, pp. 191–202, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 27-01-2016		
	<u>Kabul/Accepted</u> 25-09-2017	Doi 10.16984/saufenbilder.221303	

Düz dişlilerdeki aşınma ve kırık diş hatalarının tespit edilmesinde titreşim verileri kullanılarak istatistiksel proses kontrol uygulaması

Sinan Maraş¹, Hakan Arslan^{2*}

ÖZ

Dişli çarklar güç ve hareket iletimi için endüstrinin her alanında, değişik ortam ve koşullarda kullanılan makine elemanlarıdır. Makinelerin bu önemli elemanlarının zorlayıcı şartlar altında çalışması sonucu, dişlerde hasarlar meydana gelmekte ve daha büyük olumsuzlukları önleyebilmek için bu hasarların bilinmesi ve oluşum nedenlerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada amaç, dişli arızalarının sebep olduğu titreşimlerin istatistiksel proses kontrol grafiklerinde analiz edilerek düz dişli hata tespitini gerçekleştirmektir. Bu amaçla bir deney düzeneği kurulmuş, önce sağlam dişlilerin kullanılması ile farklı yükleme ve devir sayıları durumları için rulmanlı yataklar üzerinden radyal yöndeki titreşimler kaydedilerek referans spektrumları elde edilmiştir. Daha sonra sağlam dişliler üzerinde yapılan işlemlerle suni olarak aşınma ve kırık hasarları oluşturulmuştur. Düzenek çeşitli ön yük ve devir sayılarında çalıştırılarak rulman yataklarındaki titreşimler kaydedilmiştir. Bu titreşimlerin frekans spektrumları ve istatistiksel proses kontrol grafikleri çizdirilmiştir. Sağlam ve hasarlı dişli durumları için oluşturulan grafikler karşılaştırıldığında aşınmış dişli, tek diş kırık pinyon dişli ve tek diş kırık pinyon ve tekerlek dişli hasarlarının varlığı tespit edilebilmiştir.

Anahtar Kelimeler: düz dişli çarklar, dişli hasarları, titreşimler, istatistiksel proses kontrol, hata teşhisi

Application of statistical process control method to monitor wear and broken tooth faults in spur gears using vibration data

ABSTRACT

Gears are machine elements used extensively in many areas of industry to transmit power and motion. Damage occurs due to working under compulsive conditions effective gear fault detection is crucial to prevent greater drawbacks and economic losses. The objective of this study is to monitor the existence of different types of gear defects by examining changes in the vibrations of spur gears due to faults using vibrations analysis and statistical process control methods. For this purpose, a closed-loop test rig was constructed. Firstly, good gears were attached to the test assembly and vibrations data which received at radial direction via sensors on the bearings were recorded by operating the system at various loading and number of cycle's conditions. Thus, a reference spectrum was obtained. Then the system was operated with

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Bayburt Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, smaras@bayburt.edu.tr

² Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, arslan@kku.edu.tr

artificial wear and fracture which were created on the surfaces of spur gears at various loading and number of cycles conditions. Vibrations data which were received from the bearings were recorded. These data were plotted on statistical control charts and frequency spectrum. Graphs of data obtained from good gears and defective gears were compared with each other. Thus it was possible to detect the existence of worn gear, one tooth broken pinion gear and one tooth broken from each pinion and wheel gears.

Keywords: spur gears, gear faults, vibrations, statistical process control, fault diagnosis

1. GİRİŞ(INTRODUCTION)

Dişliler, hareket ve güç iletimi için sanayide birçok alanda kullanılmaktadır. Dişlilerde aşınma, kırılma v.b. istenmeyen hasarlar meydana geldiği zaman makinelerde istenmeyen, ani durdurular oluşmakta ve bu durum zamanla daha büyük arızalara yol açmaktadır. Böyle bir durumda, dişli çarklardaki hasarların erken tespiti son derece büyük önem arz etmektedir. Titreşim, makine içyapısında oluşabilecek durumları yansıtmada en etkin göstergelerden biridir. Bu sebeple dişlilerde hasar teşhisi titreşim analizi ile yapılabilmektedir. Titreşim verileri sinyal işleme, yapay zeka, istatistiksel yöntemlerle analiz edilerek dişlilerdeki hasarlar teşhis edilebilmektedir. Günümüzde, frekans analizi ve istatistiksel metotların dişli hasar teşhisinde uygulanması ile ilgili yapılan çalışmalar bulunmaktadır.

Fakhfakh v.d. [1] dişli temas sertliğini etkileyen hataları sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yerel ve dağılmış hatalar tarafından sırasıyla çatlak ve pullanma (spalling) başlangıcını spektrum ve dalgaform grafiklerinde modellemişlerdir. Ai ve Li [2] Hilbert-Huang dönüşümü ile titreşim sinyallerinin spektrum grafiğini elde ederek dişli çatlak hasarını incelemişlerdir. Öztürk v.d. [3] dişli çark oyukçuk arızasını dalga form, spektral analiz ve istatistiksel analiz metotlarını kullanarak tespit edilebilirliğini incelemişlerdir. Baydar ve Ball [4] titreşim sinyalleri ile akustik sinyaller karşılaştırılarak elde edilen sonuçlar, dişli kutularında birkaç tip ilerleyen hataların erken algılanmasında akustik sinyallerin geçerli bir yöntem olduğunu göstermiştir. Park ve Lee [5] çeşitli tipte hasarlı olan helisel dişlilerde, etki eden tork ile devir hızının titreşim artışındaki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Loutridis [6] dişli hataları gelişiminin izlenmesi için yeni geliştirilmiş bir metot olan deneysel ayrışım modundan bahsetmiştir. Wang [7] diş çatlaklarının erken algılanması için rezonans çözme tekniğinin,

eşzamanlı sinyal ortalama tekniği olarak geçerliliğini kanıtlamıştır. Parey ve Tandon [8] dişlideki diş kusuru büyüklüğünü, ölçülebilir titreşim sinyali ile ilişkilendirilerek bir çarpma hızı modeli sunmuş ve analitik modeli deneysel olarak doğrulamıştır. Sung v.d. [9] dalgacık dönüşümü metodu ile dişlilerde hasar tespiti üzerinde çalışmışlardır. Amabili ve Fregolent [10] model parametrelerini tanımlayan, yeni bir yöntem olan doğal frekans ile sönüm ikilisini ve düz dişli çiftinin eşdeğer dişli hatasını sunmuştur. Andrade v.d. [11] aşınma, kırık v.b. diş kusurları tespitinde Kolmogorov-Smirnov testini kullanmışlardır. Birgören ve Koçer [12] tek değişkenli kontrol şeması, yapay sinir ağı ve çok değişkenli kontrol şemalarını İstatistiksel Proses kontrol (İPK) grafiklerinde hasar tespiti için kullanılabilirliğini göstermişlerdir. Zhan v.d. [13] farklı yüklem koşullarında, sağlam dişlilerden elde edilen titreşim verilerini sinyal işleme yöntemlerinde kullanarak kırılma hasarı tespiti üzerinde çalışmışlardır. Kolmogorov-Smirnov istatistiksel analizi ile verilerin normal dağılıma sahip olduğunu göstermişlerdir. Wang v.d. [14] sağlam, aşınma, çatlak ve kırılma hasarına sahip dişliler için faz ve genlik modülasyonu, beta basıklık ve dalga dönüşümü metotlarının hasar teşhisinde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Djeddou ve Zegadi [15] ortaya koydukları istatistiksel metotların dişlilerin güvenilirlik ve ömür tahmininde iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Yimin v.d. [16] dişlilerden çeşitli yüklem durumlarında ölçülen titreşim verilerini Kolmogorov-Smirnov testi ile incelemişlerdir.

Bu çalışmada ise, bir dişli test düzeneği çeşitli yüklem ve devir sayısı durumları için çalıştırılarak düz dişlilerden elde edilen titreşimlerin değişimleri dalgaform, spektrum ve istatistiksel proses kontrol grafiklerinde incelenmiştir. İstatistiksel proses kontrol grafiklerinden hatanın başlayıp başlamadığı ve ne tür bir hata olduğu anlaşılabilen, fakat spektrumlara bakılarak sağlam dişli-aşınmış dişli ayrımı ve tek kırık dişli-çift kırık dişli ayrımı tam olarak yapılamamaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Dişlilerde Oluşan Titreşimler (Vibrations Occuring in Gears))

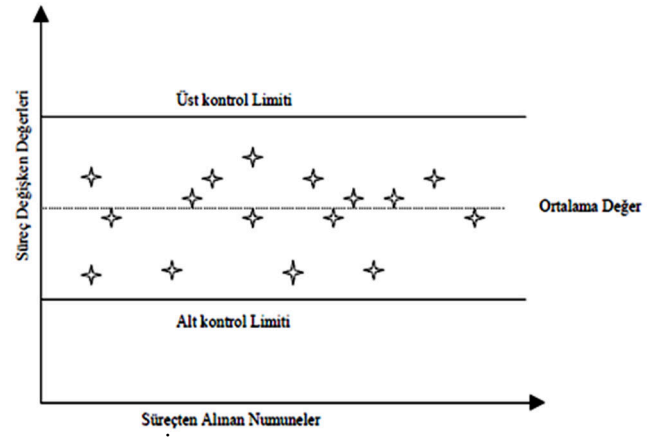
Üretim, montaj ve kavrama durumundaki rijitliğin değişmesi sebepleriyle dişlilerde titreşim meydana gelmektedir. Makine elemanları sürekli çalışma ile beraber yorulmaya uğramaktadırlar. Dişlilerde de yorulma sonucu hasarlar ortaya çıkmaktadır. Dişlilerde yorulma sebebiyle oyuklaşma ve kabarma hasarları oluşmaktadır. Gerilme dalgaları bir dişin oyuklaşmış kısmının kavramaya darbeli şekilde teması sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu dalgalar düşük seviyede genliğe sahiptir ve etkin olarak ele alınırsa kusurun erken teşhisinde kullanılabilir [17].

Dişli hataları ya da arızalı dişliler, rulmanlı yataklarda olduğu gibi düşük genlikli fakat yüksek frekanslı titreşimler oluştururlar. Titreşim genellikle dişli kavrama frekansında (DKF) çok belirgin durumdadır. Diş kavrama frekansı, giriş dişlisinin diş sayısının giriş dişlisi devir sayısı ile çarpılması sonucunda elde edilir. Sağlam dişlilerde dişli kavrama frekansında titreşimler oluşmaktadır. Doğrusal olmayan şartlardan ötürü kavrama durumu için kavrama frekansı ile birlikte onun harmonikleri de meydana gelmektedir [18].

2.2. İstatistiksel Proses Kontrol (Statistical Process Control)

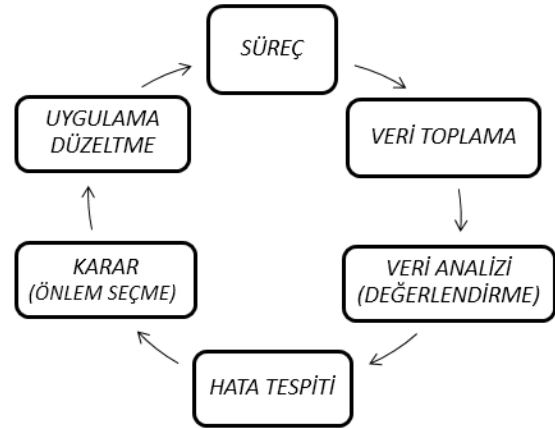
İstatistiksel proses kontrol, istenilen kalitede ürün elde edebilmek için üretim aşamasında oluşabilecek kusurların belirlenmesi, önleminin alınması ve daha etkin bir prosesin sağlanması yoluyla kullanılmakta olan istatistiksel metotları içermektedir. İstatistiksel proses kontrol, İPK grafikleri ile ürünün üretim aşamasındaki kalite verilerinin incelenmesinden oluşmaktadır.

İstatistiksel proses kontrol çizelgesi ortalama değerleri gösteren orta hat ve bu hattın altına ve üstüne çizilen alt kontrol değeri ve üst kontrol değerinden meydana gelmektedir (Şekil 1). Orta çizgi, ölçülen parametrenin amaç değerini; limitler arasındaki bölge ise müsaade edilebilir kontrollü bölgeyi ifade etmektedir. Ölçülen değerler proses boyunca İPK çizelgelerinde işaretlenmektedir.



Şekil 1. İstatistiksel proses kontrol grafiği [19].
(Example of Process Control Graph)

Grafiklerde, ölçülen değerler ve bu değerler ile elde edilen istatistik değerleri işlenmektedir ve bu değer, kontrol alanı olarak isimlendirilen bir aralıkta olursa prosesin kontrol altında olduğu sonucuna varılmaktadır. Ölçülen değer kontrol alanının dışında bulunursa proseste kontrol-dışı bir etkinin var olduğu ve proseste kusura sebebiyet veren bir kusur kaynağının sürece dâhil olduğu sonucuna varılır. Bu durumda proses durdurulup hataya neden olan sebep incelenerek bu hatanın giderilmesi için bir takım tedbirler alınır [12]. Böylelikle sürecin istatistiksel durumu görsel hale getirilmiş olur. Yapılan bu işlemle beraber operatörün kolaylıkla sürecin kontrolüne imkân sağladığı gibi çizelgelerin analiz edilmesiyle de prosesin sürekliliği sağlanmış olmaktadır. İPK uygulamasında kullanılan klasik kontrol sistemi Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. İPK uygulamasında kullanılan klasik kontrol sistemi (Classical control system used for SPC application)

2.3. \bar{X} ve S Grafikleri (\bar{X} and S Graphs)

Merkez çizgiyi ifade eden \bar{X} süreçteki her bir grubun ortalamalarının ortalaması olarak ele alınmaktadır ve alt grup standart sapma değerlerini de S kontrol grafikleri göstermektedir. Her grubun standart sapmalarının ortalaması ise merkezi çizgiyi ifade eden \bar{S} ile tanımlanmaktadır. Alt ve üst kontrol limitleri, örnekleme büyüklüğüne bakılarak standart tabloda bu değere karşılık gelen düzenleme faktörüne göre belirlenmektedir. Alt kontrol sınırı ve üst kontrol sınırı bulunurken ana kitle ortalaması bilinmediği durumlarda deneysel olarak yeterli miktarda örnekleme yapılarak bu değer tahmin edilebilmektedir. Bunun için öncelikle örnekleme hacmine (n) bakılarak, bu değer karşısındaki standart tablolarındaki değerler (A_3, B_3, B_4) seçilir ve İPK grafikleri oluşturulur [20]. A_3S değeri $3\sigma_x$ ' in uygun bir tahmini ($3\sigma_x=A_3\bar{S}$) olduğundan (σ_x =standart sapma),

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m S_i \quad (2)$$

Üst Kontrol Limiti:

$$\bar{ÜKL} = \bar{X} + A_3\bar{S} = B_4\bar{S} \quad (3)$$

Merkez Çizgi:

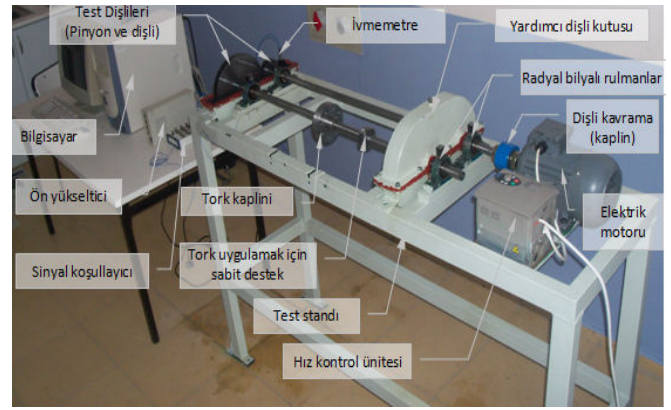
$$MÇ = \bar{X} = \bar{S} \quad (4)$$

Alt Kontrol Limiti:

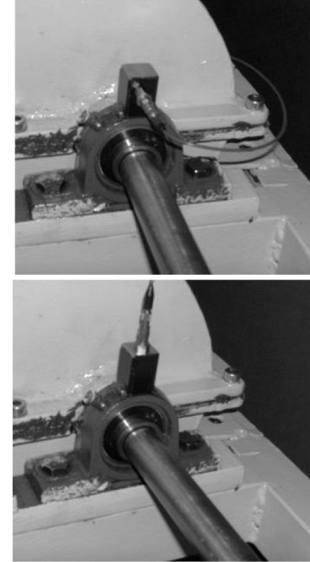
$$\bar{AKL} = \bar{X} - A_3\bar{S} = B_3\bar{S} \quad (5)$$

2.4. Deney Düzenegi (Experimental Set-Up)

Dişlilerin deneysel olarak incelenmesinde genellikle kapalı devre güç iletim düzenegi kullanılmaktadır. Bu bakımdan Şekil 3'te görüldüğü gibi kapalı devre güç iletim sistemi kurularak, çeşitli yükleme ve devir sayılarında sistem çalıştırılmıştır. Sağlam ve aşınmış dişlilerin sistemde kullanılması sonucu elde edilen titreşim genlikleri, rulmanlı yataklar üzerinde bulunan ivmeölçerler ve dijital analog çevirici sayesinde bilgisayara kaydedilmiştir. Deney sisteminde kullanılan üç fazlı AC motor 220-240 Volt, 50-60 Hz, 1.1 kW güç ve 1460 d/d hıza çıkma gibi çalışma şartlarına sahiptir. TELEMENIQE marka hız kontrol cihazı sayesinde istenilen devir sayısında motorun çalıştırılmasına imkân verilebilmektedir.



Şekil 3. Deney düzenegi (Test rig)



Şekil 4. Rulmanlı yataklar üzerine ivmeölçerlerin radyal ve eksenel yönde yerleştirilmesi (Magnetically fixed accelerometer on ball bearing at radial and axial directions.)

Şekil 4'e bakıldığında giriş dişli kutusu tarafında bulunan pinyon dişli rulmanlı yatağı üzerine manyetik olarak sabitlenen piezo-elektrik ivme alıcısının yerleştirildiği görülmektedir. PCB 352C68 model ivmeölçer (Ölçüm aralığı 0.5 Hz-10 kHz ve hassasiyeti 9.27 mV/g olan) titreşimin sebep olduğu basınç nedeniyle elektriksel sinyalleri oluşturmakta ve ivme alıcısından gelen sinyaller PCB 482A16 model sinyal koşullayıcı da elektrik sinyali taşınabilir bir voltaj sinyaline çevrilmekte ve filtreleme işlemi yapılmaktadır. Elektrik sinyalleri olarak A/D veri toplama kartına gelen veriler, çevrim hızı 1 MS/s olan 16-Bitlik NI PCI-6251 A/D veri toplama kontrol kartına aktarılmakta ve ivme verileri haline bilgisayar ortamındaki yazılım vasıtasıyla getirilmektedir. Bu veriler, Fourier analizi vasıtasıyla zaman ortamından frekans ortamına aktarılmaktadır.

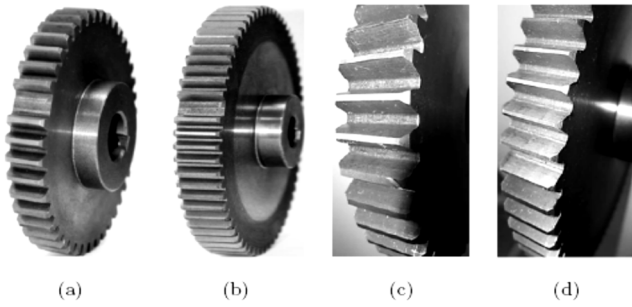
Deneylerde Çizelge 1'de özellikleri verilen dişliler kullanılmıştır. Öncelikle, herhangi bir kusura

sahip olmayan düz dişliler kullanılarak farklı yüklemeler (25, 50 ve 75 Nm) ve devir sayıları (250, 500 ve 750 d/d) durumlarındaki referans genlikleri elde edilmiştir. Deney sistemindeki karşılıklı dişlilerde sonrasında suni olarak kusurlar meydana getirilmiştir (Şekil 4).

Deneyler Şekil 5’ te görüldüğü gibi sağlam dişlilerle, pinyon ve çevrilen dişlide dişler aşındırıldığında, sağlam pinyon dişli ile 1 tane dişin dibinden kırıldığı çevrilen dişlide ve hem pinyon hem de çevrilen dişlilerin her birinde birer adet dişin diplerinden kırıldığı 4 farklı kategoride yapılmıştır. Deneyler, devir sayısı sabitken yüklem miktarının değiştirilmesi, yüklem değeri sabitken motor devir sayısının değiştirilmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan dişlilerin özellikleri
(Parameters of the used test gear pair)

	Pinyon Dişli	Çevrilen Dişli
Diş Üstü Çapı (mm)	90	228
Diş Sayısı	46	74
Modül (mm)	2.5	2.5
Diş Geniği (mm)	23	23
Malzeme	GG25 Pik Dökme Demir	GG25 Pik Dökme Demir



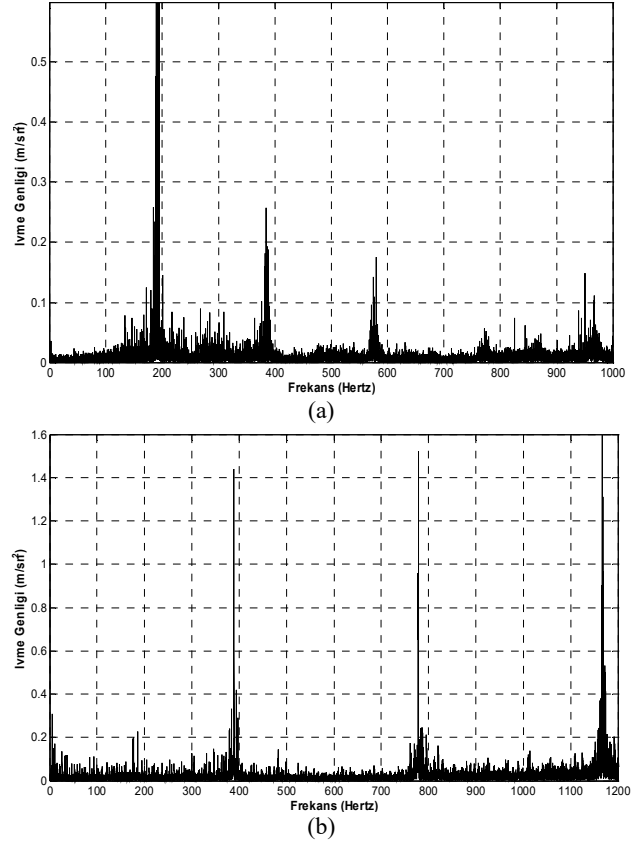
Şekil 5. Test Dişli Resimleri a) Tek diş kırık pinyon b) Tek diş kırık çevrilen dişli c) Aşınmış pinyon dişli d) Aşınmış çevrilen (tekerlek) dişli.
(Test Gear Photos a) pinion gear with one tooth broken b) wheel gear with one tooth broken c) worn pinion gear d) worn wheel gear.)

3. TARTIŞMA VE YORUMLAR (RESULT AND DISCUSSIONS)

3.1. Frekans Spektrum Grafikleri ve Yorumları (Discussion of Obtained Frequency Spectrum Graphs)

3.1.1. Sağlam Dişliler (Good Gears)

Şekil 6.a’da görüldüğü gibi sağlam dişlilerde 250 d/d mil hızı için dişlinin radyal yöndeki frekans spektrumundaki en büyük zirveler beklediği gibi çevrilen dişli DKF (195 Hz) ve onun harmoniklerinde (390 Hz, 585 Hz,..) ortaya çıkmaktadır. Sağlam dişli için mil hızı 500 d/d’ya yükseltildiğinde, dişlinin frekans spektrumundaki en büyük zirveler Şekil 6.b’de görüldüğü gibi çevrilen dişli DKF (390 Hz) ve onun harmoniklerinde (780 Hz, 1170 Hz,..) ortaya çıkmaktadır.



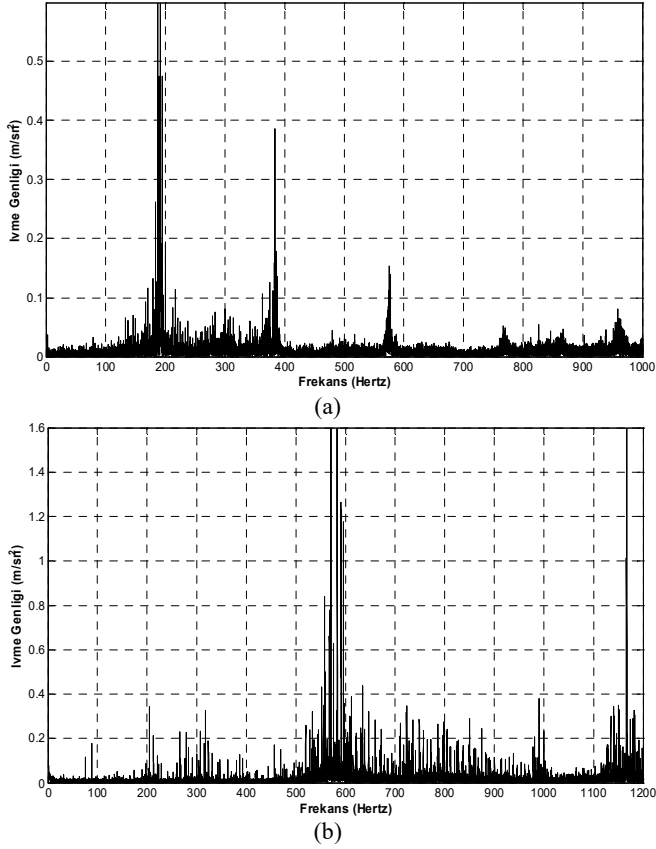
Şekil 6. 25 Nm yük ve $n=250$ d/d, 500 d/d mil hızları için sağlam dişlinin frekans spektrum grafiği (Frequency spectrum graphs of the good gears for 25 Nm loading and a) 250 rpm b) 500 rpm motor speed conditions.)

3.1.2. Aşınmış Dişliler (Worn Gears)

Şekil 7.a’da görüldüğü gibi dişleri aşındırılmış dişli için pinyon dişli hızı 250 d/d alındığında, dişlinin x yönündeki frekans spektrumundaki en büyük zirveler çevrilen dişli DKF (195 Hz), harmoniklerinde (390 Hz, 585 Hz, ...) ve DKF’nin harmoniklerinin çevrilen dişli mil dönme hızı (2,63 Hz) ile olan yan bantlarında (195 ± 2.63 Hz, ± 5.26 Hz, ± 7.89 Hz ve harmonikleri) ortaya çıkmaktadır.

Pinyon dişli hızı 750 d/d’ya yükseltildiğinde, Şekil 7.b’de görüldüğü gibi frekans spektrumundaki en büyük zirveler, çevrilen dişli DKF (584 Hz), harmoniklerinde (1168 Hz, 1752

Hz,...) ve DKF' nin harmoniklerinin çevrilen dişli mil dönme hızı (7.89 Hz) ile olan yan bantlarında ($584 \pm 7.89 \text{ Hz} \pm 15.78 \text{ Hz} \pm 23.67 \text{ Hz}$) görülmektedir.



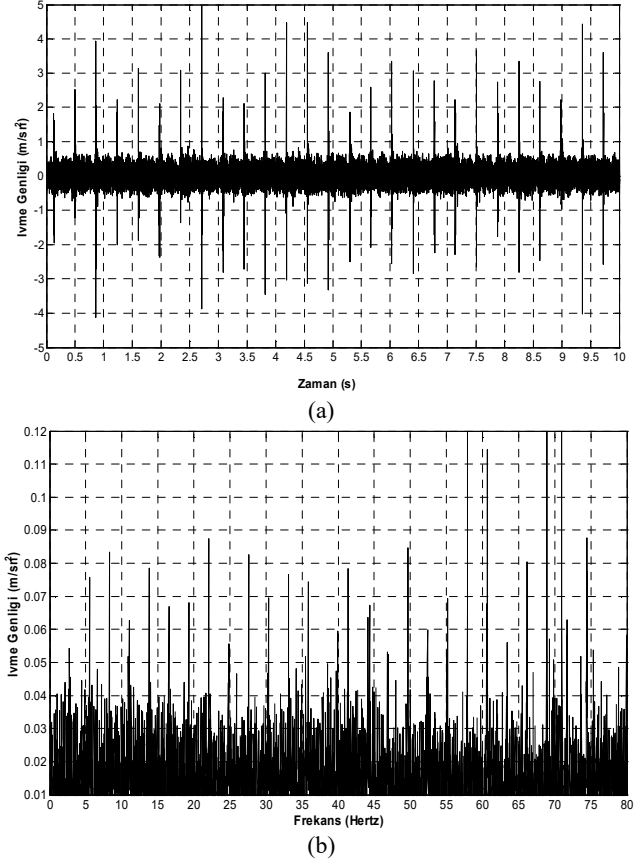
Şekil 7. 25 Nm yük ve $n=250 \text{ d/d}$, 750 d/d mil hızları için dişleri aşınmış dişlinin frekans spektrum grafiği (Frequency spectrum graphs of the worn gears for 25 Nm loading and a) 250 rpm b) 750 rpm motor speed conditions.)

3.1.3. Kırık Dişliler(Broken Gears)

Kırık dişli için elde edilen titreşim grafiği periyodik vuruntulu genlik-zaman grafiği olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu vuruntular arasındaki zaman $1/\text{kırık dişin dönme hızı}$ değerine eşittir. Kırık dişli vuruntu frekansı;

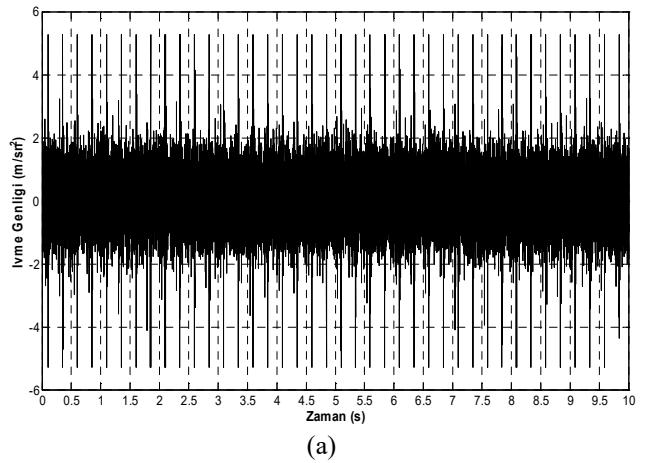
$$f = \frac{1}{n_{k.d.}} = \frac{1}{2.63 \text{ Hz}} \cong 0.38 \text{ s}$$

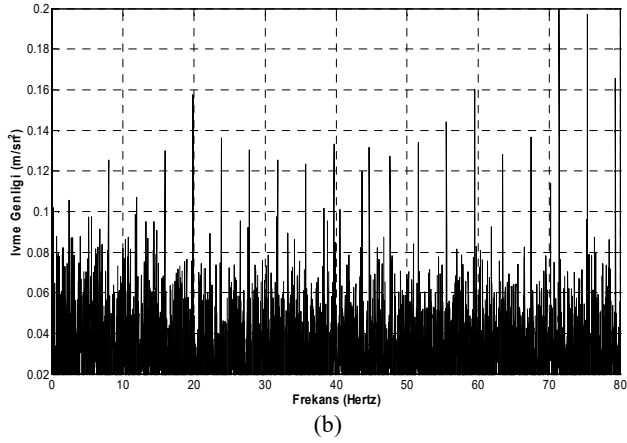
görüldüğü gibi kırık dişlisinde 250 d/d mil hızı için dişlinin x yönündeki salınımı, periyodik olarak 0.38 s aralıklarla periyodik vuruntular şeklindedir. Yani mil dönme hızına bağlı olarak kırık diş diğer dişliye temas ettiği anda vuruntular oluşmaktadır. Şekil 8.b 'de frekans spektrumu grafiğinde bu durum dişli dönme devri (2.63 Hz , 5.26 Hz ,...) ve harmoniklerinde nispeten yüksek genlikli titreşimler olarak görülmektedir.



Şekil 8. 25 Nm yük ve $n=250 \text{ d/d}$ mil hızı için tek dişli kırık dişlinin titreşim ve frekans spektrum grafiği (Vibration signals and frequency spectra graphs of the one tooth broken gear for 25 Nm loading and 250 rpm motor speed conditions.)

Şekil 9.a 'da görüldüğü gibi kırık dişlisinde 500 d/d mil hızı için dişlinin x yönündeki salınımı, periyodik olarak 0.2 s aralıklarla vuruntular şeklindedir. Yani mil dönme hızına bağlı olarak kırık diş diğer dişliye temas ettiği anda vuruntular oluşmaktadır. Şekil 9.b 'de frekans spektrumu grafiğinde bu durum gürültü genliklerinin yüksek olması nedeniyle açık olarak görülemez.

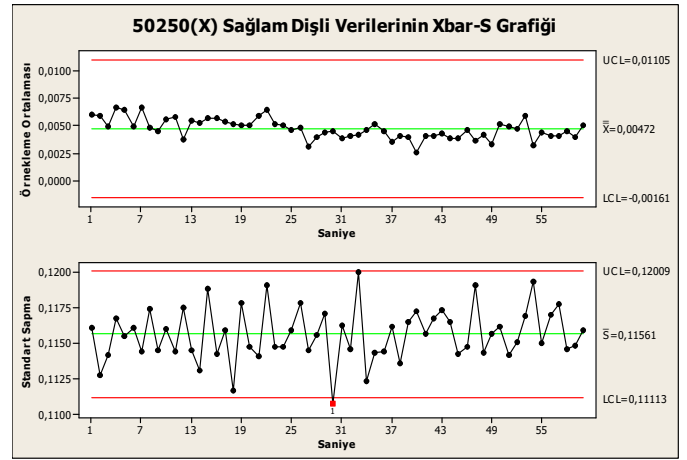




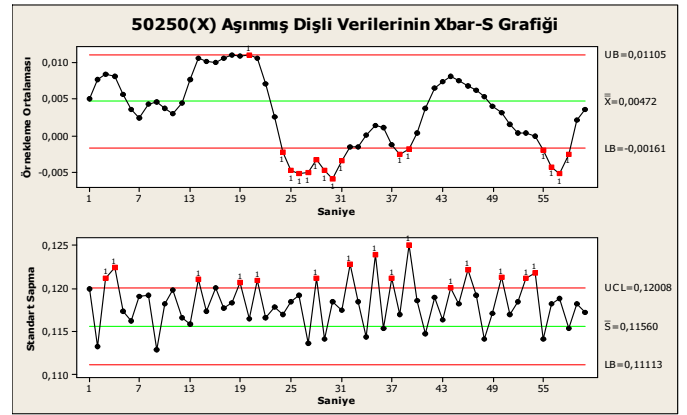
Şekil 9. 75 Nm yük ve $n=500$ d/d mil hızı için tek dişli kırık dişlinin titreşim ve frekans spektrum grafiği (Vibration signals and frequency spectra graphs of the one tooth broken gear for 75 Nm loading and 500 rpm motor speed conditions.)

3.2. $\bar{X}-S$ Grafikleri ve Yorumları ($\bar{X}-S$ Graphs and Their Discussion)

Yapılan deneyler sonucu toplanan titreşim verileri MINITAB paket programı kullanılarak istatistiksel proses kontrol şemaları çizdirilmiştir. Grafiklerde 1 dakikalık çalışma skalası ve örnekleme büyüklüğü olarak saniyede 3000 veri alınarak analiz gerçekleştirilmiştir. Hasarlı olmayan sağlam durumdaki dişliden elde edilen verilerin kullanılması sayesinde alt ve üst kontrol sınırları tespit edilmiştir. Hatalı dişlilerin çalıştırılması sonucu toplanan veriler İPK grafiklerinde incelenerek hasarların tespit edilebilirliği istatistiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 10 'da 50 Nm ve 250 d/d çalışma durumundaki, herhangi bir hasarı olmayan düz dişlinin çalıştırılması sonucu elde edilen titreşim verileri kullanılarak çizilen $\bar{X}-S$ grafiği yer almaktadır. Alt ve üst kontrol limitleri, örnekleme hacmine (n) bakılarak bu değer karşısındaki standart tablolarındaki değerlerden (A_3, B_3, B_4) seçilip, bu değerlerin (3-5) numaralı ifadelerde kullanılmasıyla belirlenmektedir [20]. Grafikte örnekleme ortalaması ve standart sapma değerleri sırasıyla 0.00472 ve 0.11561 olarak hesaplanmış, sağlam durumdaki dişliden elde edilen verilerin merkezi hat etrafında rastgele bir şekilde dağıldığı, AKL ve ÜKL ihlallerinin olmadığı sadece standart sapma grafiğinde 30. saniyede bir ihlalin olduğu görülmektedir.

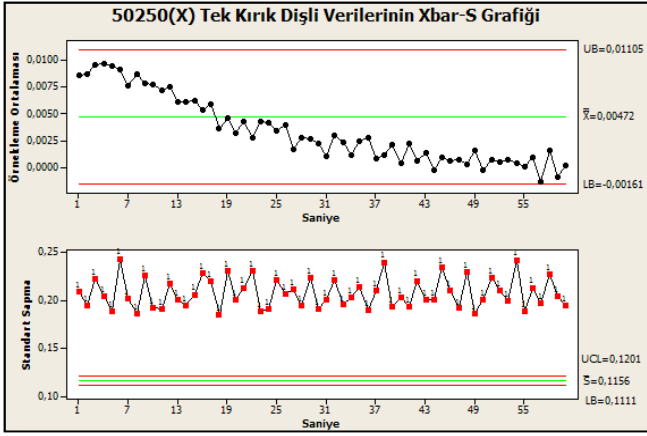


Şekil 10. 50 Nm yük ve 250 d/d motor hızı için sağlam dişli $\bar{X}-S$ grafiği ($\bar{X}-S$ graph obtained from good gear for 50 Nm loading and 250 rpm motor speed)



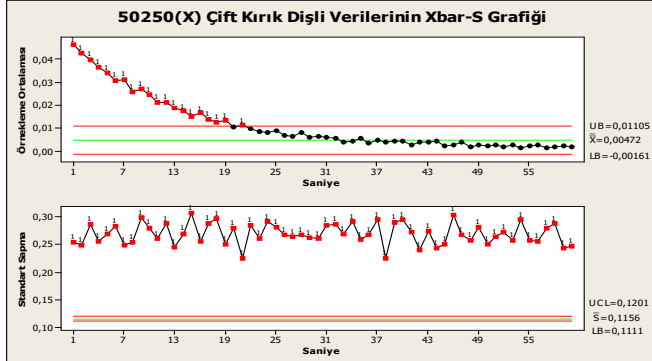
Şekil 11. 50 Nm yük ve 250 d/d motor hızı için aşınmış dişli $\bar{X}-S$ grafiği. ($\bar{X}-S$ graph obtained from worn gears for 50 Nm loading and 250 rpm motor speed.)

Şekil 11'de sağlam dişli verileriyle hesaplanan örnekleme ortalaması, standart sapma ve kontrol sınırları dikkate alınarak bir dakika çalışma skalası için oluşturulmuş aşınmış dişli titreşim verilerinin $\bar{X}-S$ grafiği yer almaktadır. Grafikte aşınmış dişli titreşim verilerinin normal olmayan bir eğilim izlediği ve örnekleme ortalaması şemasında zaman olarak 20. saniyeden sonra AKL değerinin dışına çıkmaların olduğu görülmektedir. Standart sapma grafiğinde ise, titreşim verilerinin merkez çizgi etrafında inişli-çıkışlı bir davranış içerisinde olduğu ve ÜKL sınır ihlallerinin gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 12. 50 Nm yük ve 250 d/d motor hızı için tek diş kırık pinyon dişli \bar{X} -S grafiği (\bar{X} -S graph obtained from one tooth broken pinion gear for 50 Nm load and 250 rpm motor speed)

Şekil 12’de sağlam dişli limit değerleri kullanılarak bir dakikalık çalışma sonucu tek diş kırık dişlinin titreşim verilerinin \bar{X} -S grafiği görülmektedir. Grafikte, dişli titreşim verileri kontrol grafiklerinde anormal bir davranış sergilemektedir. Örneklem ortalaması grafiğindeki değerler, AKL ve ÜKL arasında istikrarlı bir şekilde azalma göstermektedir. Standart sapma grafiğinde ise, bütün verilerin ÜKL üzerinde inişli-çıkışlı bir davranış içerisinde olduğu görülmektedir.



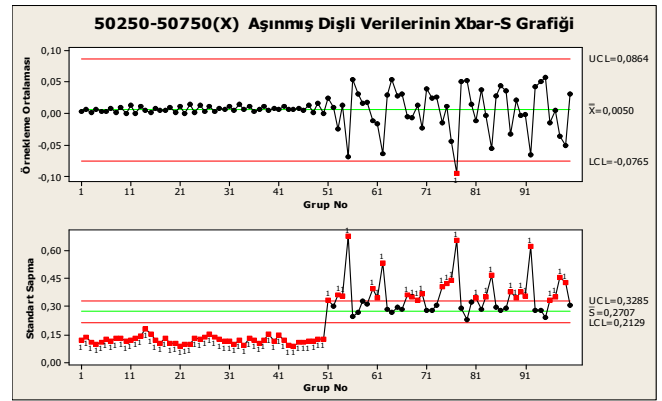
Şekil 13. 50 Nm yük ve 250 d/d motor hızı için kırık dişli çifti \bar{X} -S grafiği (\bar{X} -S graph obtained from one tooth broken from each pinion and wheel gear for 50 Nm load and 250 rpm motor speed)

Şekil 13’te sağlam dişli limit değerleri kullanılarak bir dakikalık çalışma sonucu çift diş kırık dişlinin titreşim verilerinin \bar{X} -S grafiği görülmektedir. Grafikte, kırık dişlilerin titreşim verileri normal olmayan bir eğilim izlemektedir. Örneklem ortalaması şemasında, başlangıçta ÜKL üzerinde olan değerler 20. saniyeden itibaren kontrol sınırları içinde kalmaktadır. Standart sapma grafiğinde ise, bütün verilerin ÜKL ’nin çok

üzerinde inişli-çıkışlı bir davranış içerisinde olduğu görülmektedir.

Aşınma hasarına sahip dişlinin 50 Nm sabit yüklemeye, 250 ve 750 d/d motor hızı ile sistemin çalıştırılması neticesinde, toplanan titreşim verileri ile oluşturulan \bar{X} -S grafiği Şekil 14 ’deki gibidir. Grafikte her iki motor hızı için 5000 veri olmak üzere toplamda 10000 veri 100’ erli grup şeklinde ele alınmıştır. Grafiklerde ilk 50 grup 250 d/d, ikinci 50 grupta 750 d/d için titreşim kontrol verilerini göstermektedir.

Grafikte 50 Nm yük ve 250, 750 d/d motor hızları için, örneklem ortalaması ve standart sapma parametreleri sırasıyla 0.005 ve 0.2707 olarak hesaplanmıştır. Örneklem ortalaması grafiğine bakıldığında, ilk 50 grupta verilerin ortalama değer civarında rastgele bir dağılıma sahip olduğu, 51. gruptan itibaren ise verilerin AKL ye yaklaştığı görülmektedir. Standart sapma değerleri ilk 50 grupta AKL ’nin altında, 51. Gruptan itibaren ise sınır ihlalleri başlayarak ÜKL ’nin oldukça üzerine çıkmaktadır.

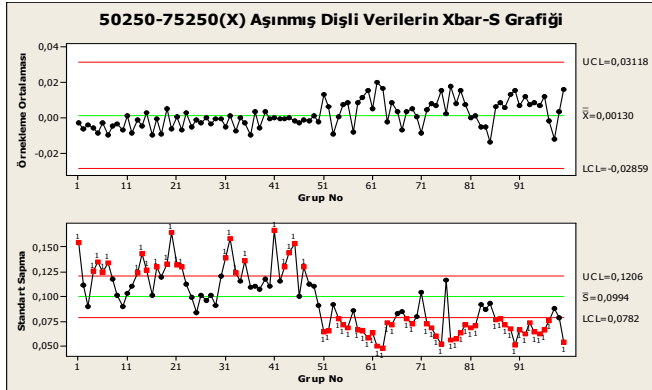


Şekil 14. 50 Nm yük ve 250, 750 d/d motor hızları durumunda aşınmış dişli verilerinin \bar{X} -S grafiği (\bar{X} -S graph obtained from worn gears for 50 Nm load and 250-500 rpm motor speeds)

250 d/d hızla dönen aşınmış dişlinin 50 N/m ve 75 N/m yüklemeye durumlarında toplanan titreşim verileri ile oluşturulan \bar{X} -S grafiği Şekil 15’deki gibidir. Grafiklerde ilk 50 grup 50 N/m, ikinci 50 grupta 75 N/m için titreşim kontrol verilerini göstermektedir.

Grafikte 50 Nm ve 75 Nm yükleri ve 250 d/d motor hızı için, örneklem ortalamasının 0.0013 ve standart sapma değerinin 0.0994 olduğu görülmektedir. Örneklem ortalaması grafiğine bakıldığında, ilk 50 grupta görülen verilerin normal olmayan bir şekilde dağılıma sahip olduğu ve merkez çizginin altında daha yoğun bir şekilde bulunduğu, 51. gruptan itibaren ise verilerin

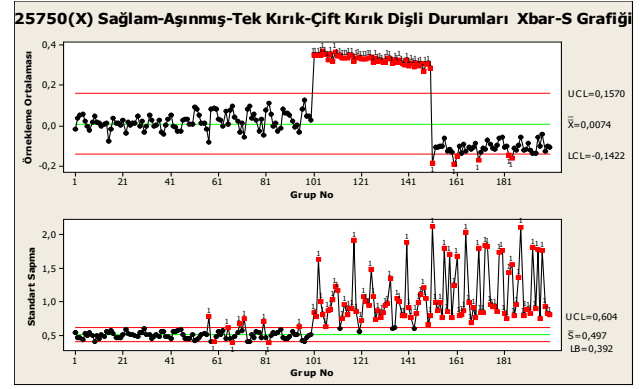
kontrol sınırlarına doğru giderek yakınsadığı görülmektedir. Standart sapma grafiğinde ise ilk 50 grupta görülen verilerin bir kısmının ÜKL 'yi geçerek sınır ihlali yaptığı, 51. gruptan sonra verilerin büyük bir kısmının AKL 'yi geçerek sınır ihlali yaptığı görülmektedir.



Şekil 15. 250 d/d motor hızı ve 50 Nm-75 Nm yüklemelerde aşınmış dişli verilerinin \bar{X} -S Grafiği (\bar{X} -S graph obtained from worn gears for 250 rpm motor speed and 50Nm-75Nm loading conditions)

Şekil 16 'da sağlam dişli limit değerleri kullanılarak 25N ve 750 d/d çalışma şartlarındaki sağlam, aşınmış, tek kırık ve çift kırık dişlilerden toplanan titreşim verileriyle oluşturulan \bar{X} -S grafiği görülmektedir. Grafikte ilk 50 grup sağlam durumundaki dişlilerden, 51. grup ile 100. grup arası çevrilen dişlide dişlerin aşındırıldığı durumdaki dişlilerden, 101. grup ile 150. grup arası, çevrilen dişlide 1 adet diş dibinden kırıldığı durumdaki dişlilerden elde edilen titreşim verilerini göstermektedir. Grafikte 25 Nm yük ve 750 d/d motor hızı için, örnekleme ortalamasının 0.0074 ve standart sapma değerinin 0.497 olduğu görülmektedir. Ortalama ve standart sapma grafiğinde, ilk 50 grupta titreşim verilerinin merkez çizgi etrafında inişli-çıkışlı bir davranış sergilediği, kontrol sınırlarını aşma gibi anormal bir sürecin kendini göstermediği görülmektedir. 51. grup ile 100. grup arası verilerin, sağlam durumdaki dişli verilerine göre, ortalama ve standart sapma değerlerinde çok büyük bir artış olduğu ve sınır ihlallerinin başladığı görülmektedir. 101. grup ile 150. grup arası kırık dişli verilerinin aşınmış dişli verilerine göre, ortalama ve standart sapma değerlerinde çok büyük bir artış olduğu ve sınır ihlallerinin sürekli bir hal alarak değerlerin ÜKL 'nin üstüne çıktığı görülmektedir. 151. grup ile 200. grup arası verilerin örnekleme ortalaması değerleri anormal bir eğilim izlemekte ve sınır ihlalleri olmaktadır. Standart sapma grafiğinde ise ani artışların ve sınır ihlallerinin sürekli bir hal

aldığı ve bütün verilerin ÜKL 'nin üstüne çıktığı görülmektedir.



Şekil 16. 25 Nm yük ve 750 d/d motor hızı için sağlam, aşınmış, tek kırık, çift kırık dişli verilerinin \bar{X} -S karşılaştırma grafiği (Comparison \bar{X} -S graphs of test data received from good, worn, one tooth broken pinion gear, one tooth broken from each pinion and wheel gear for 25Nm load and 750 rpm motor speed)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, çeşitli tipte hasara sahip olan düz dişlilerin, farklı çalışma şartları esnasında elde edilen titreşimlerdeki değişimler irdelenmiştir. Dişlilerde oluşan aşınma, kırılma gibi hasarlar titreşim analizi yöntemi ve istatistiksel proses kontrol metodu ile analiz edilerek teşhis edilebilmiştir. Bu amaçla, kapalı devre dişli test düzeneği kurulmuştur. İlk önce hasarlı olmayan sağlam dişlilerin düzeneğe takılması ve daha sonra da hasarlı dişlilerin düzeneğe takılması ile sistem çalıştırılmış ve farklı yüklemeler ve motor devir sayısı durumları için titreşim değerleri kaydedilmiştir. Ölçülen titreşim değerleri, titreşim analizi yöntemi kullanılarak referans spektrumları ve kusurlu dişlilerden elde edilen spektrumlar elde edilmiştir. Bu spektrumlar incelendiğinde, kusurlu dişliler için spektrumlardaki kusur frekansları ve bu frekanslarda titreşim genliklerindeki artışlar gözlemlenmiştir.

Daha sonra istatistiksel proses kontrol yöntemi kullanılarak sağlam dişlilerden elde edilen verilerle kontrol grafikleri oluşturulmuş ve bu şekilde referans olarak kullanılacak olan alt ve üst kontrol sınırı değerleri tespit edilmiştir. İstatistiksel proses kontrol grafiklerinden, sağlam durumdaki dişli verilerine kıyasla, aşınma ve kırık hasarları durumlarında titreşim genlik değerlerinde ve bunun yanı sıra örnekleme ortalaması ve standart sapma değerlerinde artış olduğu, sınır ihlallerinin başladığı



görülebilmektedir. Yani hatanın derecesi arttıkça ortalama ve standart sapma grafiklerindeki titreşim verilerinin anormal bir davranış sergilediği ve ÜKL veya AKL' nin dışına çıkmaya başladığı tespit edilmiştir.

Aşınmış dişliler için elde edilen istatistiksel \bar{X} ve S kontrol grafiklerine bakıldığında; sabit yükleme durumunda, motor devir sayısındaki artışla beraber örnekleme ortalaması ve standart sapma değerlerinde de artış olduğu, ayrıca aynı devir sayısındaki çalışma koşullarında yükleme miktarının artırılması ile beraber, yine örnekleme ortalaması ve standart sapma değerlerinde artış olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca kırık dişliler için de çalışma şartlarındaki değişime bağlı olarak benzer bir sonuç alınacağı öngörülmektedir. Kontrol grafikleri(özellikle standart sapma) dişlilerde oluşan hasarların türüne bağlı olarak farklı bir davranış sergilemekte ve bu grafiklerden hatanın türü ve mertebesi de anlaşılabilir. Fakat spektrumlara bakılarak sağlam dişli-aşınmış dişli ayırımı ve tek kırık dişli-çift kırık dişli ayırımı tam olarak yapılamamaktadır. Sonuç olarak, düz dişlilerde oluşan aşınma ve kırık hasarları istatistiksel proses kontrol metodu ile tespit edilebilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Fakhfakh, F. Chaari and M. Haddar, “Numerical and experimental analysis of a gear system with teeth defects”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, no. 5-6, pp. 542-550, 2005.
- [2] S. Ai and H. Li, “Gear fault detection based on ensemble empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform”, *5th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 2008, pp. 173-177.
- [3] H. Öztürk, İ. Yeşilyurt ve M. Sabuncu, “Dişli çark oyukçuk arızasının titreşim analizi ile tespiti”, *Makine Teknolojileri Dergisi*, Aralık, pp. 72-79, 2005.
- [4] N. Baydar and A. Ball, “A comparative study of acoustic and vibration signals in detection of gear failures using Wigner-Ville distribution”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, no. 6, pp. 1091-1107, 2001.
- [5] C. Park and J.M. Lee, “Experimental investigation of the effect of lead errors on helical gear and bearing vibration transmission characteristics”, *KSME International Journal*, vol. 16, no. 11, pp. 1395-1403, 2002.
- [6] S.J. Loutridis, “Damage detection in gear systems using empirical mode decomposition”, *Engineering Structures*, vol. 26, no. 12, pp. 1833-1841, 2004.
- [7] W. Wang, “Early detection of gear tooth cracking using the resonance demodulation technique”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, no. 5, pp. 887-903, 2001.
- [8] A. Parey and N. Tandon, “Impact velocity modelling and signal processing of spur gear vibration for the estimation of defect size”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, no. 1, pp. 234-243, 2007.
- [9] C.K. Sung, H.M. Tai and C.W. Chen, “Locating defect of a gear system by the technique of wavelet transform”, *Mechanism and Machine Theory*, vol. 35, no. 8, pp. 1169-1182, 2000.
- [10] M. Amabili and A. Fregolent, “A method to identify modal parameters and gear errors by vibrations of a spur gear pair”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 214, no. 2, pp. 339-357, 1998.
- [11] F.A. Andrade, L.L. Esat, and M.M. Badi, “Gear condition monitoring by a new application of the Kolmogorov-Smirnov test”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 215, no. 6, pp. 653-661, 2001.
- [12] B. Birgören, ve B. Koçer, “İstatistiksel proses kontrol çizelgelerinde hata teşhisine yönelik yaklaşımlar”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, cilt. 17, no. 4, pp. 59-69, 2004.
- [13] Y. Zhan, V. Makis and A.K.S. Jardine, “Adaptive state detection of gearbox under varying load conditions based on parametric modelling”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, no. 1, pp. 188-221, 2006.
- [14] W.Q.Wang, F. Ismail and M.F. Golnaraghi, “Assessment of gear damage monitoring techniques using vibrations measurements”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 15, no. 5, pp. 905-922, 2001.

- [15] F. Djeddou and R. Zegadi, “Practical statistical methods for predicting life reliability of fine pitch gear pairs”, *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, no. 3, pp. 494-500, 2007.
- [16] S. Yimin and C.K. Mechefske, “Gearbox vibration monitoring using extended kalman filters and hypothesis tests”, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 325, no. 3, pp. 629–648, 2009.
- [17] S. Orhan, ve N. Aktürk "Aktarma organı dişlilerinde oluşan fiziksel hataların titreşim analizi ile belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt. 18, no. 3, pp. 97-106, 2003.
- [18] J.I. Taylor, *The Vibration Analysis Handbook*, Vibration Consultant Inc., Florida, 1994.
- [19] M. Örümlü, “Üretim sürecinde istatistiksel proses kontrol ve işletme uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [20] D.C. Montgomery, *Introduction to Statistical Quality Control*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 2013.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 17-04-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 25-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.306684	

Ergonomik ürün tasarımına bütünleşik bir yaklaşım

Burak Efe^{*1}, Ömer Faruk Efe², Mustafa Kurt³

ÖZ

Günümüzde teknoloji hızlı gelişmekte ve müşterilerin ürünlerden beklentileri artmaktadır. Bu nedenle müşteri isteklerinin ön plana çıkması ve sürekli değişmesi ürün tasarımını geçmişe göre daha önemli kılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan çamaşır makinesini üreten firmalar pazar payına sahip olabilmeleri için müşteri isteklerini göz önünde bulundurmak zorundadır. Müşteri isteklerinden birisi de ergonomik kullanım kolaylığıdır. Bu çalışmada ergonomik bir çamaşır makinesi tasarımında müşteri isteklerine ve firma kapasitesine göre teknik özellikler üzerinde iyileştirme yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmada kalite fonksiyon yayılımı yöntemi ve bulanık çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımı ergonomik çamaşır makinesi tasarımı için önerilmiştir. Kalite fonksiyon yayılımı müşteri istekleri ve teknik özellikler arasındaki ilişkiyi belirleyebilmektedir. Bu sonuçlara göre ergonomik bir çamaşır makinesi tasarımı için hangi teknik özelliğin daha önemli olduğu belirlenmiştir. Ancak bu sonuç sadece müşteri isteklerine göre belirlenmiştir. Firma kapasitesi ihmal edildiği için firmanın zaman ve maliyet açısından problemlerle karşılaşması ve pazar rekabetinde geri kalması söz konusudur. Firma ergonomik bir çamaşır makinesi tasarlarlarken müşteri isteklerinin maksimize edilmesi, maliyetin düşürülmesi, zamanın minimize edilmesi gibi farklı amaçlara sahiptir. Bu çalışma bu problemi ortadan kaldırmak için müşteri istekleri ve firma kapasitesini birlikte inceleyen Zimmermann ve hibrid yaklaşım olmak üzere iki bulanık çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımını önermiş ve elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ergonomik çamaşır makinesi, Kalite fonksiyon yayılımı, bulanık çok amaçlı doğrusal programlama, Ürün tasarımı

An integrated approach for ergonomic product design

ABSTRACT

Nowadays technology develops rapidly and the customer requirements (CRs) on product increase. Therefore, the CRs change continuously and are more important than past so that product design is more important than past. Firms, which manufacture the washing machines used commonly, must consider the CRs to have the market share. One of the CRs is ergonomic ease of use. This paper aims to improve on technical characteristics in an ergonomic washing machine design according to the CRs and the capacity of the firm. This paper proposes an integrated approach, which consists of quality function deployment (QFD) method and fuzzy multi-objective linear programming (FMOLP) method, for an ergonomic washing machine design. QFD method defines the relation between the CRs and technical characteristics. This result presents the importance degrees of technical characteristics for an ergonomic washing machine design but this result is defined according to only the CRs. Firm can meet with some problems in terms of time and cost due to neglecting of the capacity of the firm thus the firm can fall behind in market competitive. The

*1Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, burakefe0642@gmail.com

²Gümüşhane Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Fakültesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, omerfarukefe86@gmail.com

³Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, mkurt@gazi.edu.tr

firm considers different objectives such as maximizing the CRs, minimizing the cost and minimizing the time for an ergonomic washing machine design. This paper proposes two FMOLP methods, which consist of Zimmermann and hybrid approaches, to overcome this drawback so that the obtained results are compared.

Keywords: Ergonomic washing machine, Quality function deployment, fuzzy multi-objective linear programming, product design

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde müşteri istek ve ihtiyaçlarını karşılamak için üretilen ürünler, üreticilerin pazardan önemli bir pay almalarını sağlamak için yetersizdir. Çünkü müşterilerin istekleri beklenilenden daha yüksektir. Bu durum, tasarım aşamasında yeni ürün geliştirmeyi daha önemli ve zor kılmıştır [1]. Yeni ürün geliştirme (YÜG) ve inovasyon sıklıkla pazarda rekabetin anahtar süreçleri olarak tanımlanır. YÜG, yüksek hata oranının sonuçlarının yüksek maliyete neden olacağını ifade etmektedir [2]. Firmalar YÜG sürecinde rekabet avantajlarını kaybetmenin yüksek riskleriyle karşılaşır [3].

Firmalar YÜG sürecinde iki tip hatalı karar verdiği belirlenmiştir [3,4]:

1. Firmalar potansiyel olarak başarısız yeni ürün fikrini sürdürmeye karar verebilirler. Kalitesiz yeni ürünün ticarileştirmesini sonlandırma katlanılmaz maliyet ve kaynak tüketimine neden olacak. YÜG projelerini başladıktan sonra sonlandırmak yöneticiler için zordur. Bu yüzden, ticarileştirilen yeni ürün proje yaklaşımlarının maliyetleri normal olarak artan oranda büyümektedir. Zarara neden olan bu maliyetler YÜG sürecindeki kararların gelecekte devam edip etmeyeceğinde büyük bir etkiye sahiptir.
2. Firmalar potansiyel olarak başarılı yeni ürünü geliştirmemeye karar verebilirler. Bu durum doğal olarak yatırım fırsatlarının kaçmasına neden olacaktır.

Müşteri istekleri çok hızlı bir şekilde değişmektedir. Bu yüzden firmaların müşteri isteklerine hızlı ve doğru biçimde cevap verebilmesi firmaların pazarda yer alabilmeleri için oldukça önemlidir. Tasarım prosesinin ilk

aşamasında müşteri istekleri belirlenmeli, bu müşteri istekleri baz alınarak ürün spesifikasyonlarının bir listesi geliştirilmelidir. Bu spesifikasyonlar ürün tarafından sağlanmalıdır. Konsept tasarımının sonraki aşaması tasarım prosesidir ve alt sistemlerin kurulmasını kapsar. Çeşitli konseptler belirlendikten sonra en yüksek performansı ve en düşük maliyeti veren alt kümelerden oluşan en iyi kombinasyon seçilir. Bu proses konsept seçimi olarak adlandırılır. Bu aşamadan sonra tasarım prosesi detaylı çözüme doğru ilerler. Konsept gelişim prosesinin aşamalarından biri olan konsept seçiminin amacı, prosesin başlangıcında en uygun olanı seçmektir. Ürün konsept seçim aşaması ürün geliştirme prosesinin en önemli adımıdır. Prosesin ilerleyen aşamalarında tasarımı değiştirmek maliyetli ve zor bir iştir. Maliyetlerin yaklaşık olarak %60-80'i bu aşamada ortaya çıkmaktadır. Yeni bir ürünün başarılı şekilde piyasaya sunulması iyi tanımlanmış bir ürün geliştirme prosesinin sonucudur. Ürün geliştirme prosesi; planlama, konsept geliştirme, sistem-düzye tasarımı, detaylı tasarım, deneme ve ayıklama, ve deneme üretimi aşamalarından oluşur. Ürün gelişim prosesi planlama aşaması ile başlar. Bu aşamanın çıktıları aynı zamanda konsept gelişim aşamasının girdisini oluşturmaktadır ve bu girdiler ürün geliştirme takımına yol göstermektedir. Ürün gelişim prosesinin son aşaması ürünün piyasaya sunulması ve satın alınması için ürünün hazır hale getirilmesidir. Yeni bir ürünün başarılı şekilde piyasaya sunulması iyi tanımlanmış bir ürün geliştirme prosesinin sonucudur. Ürün geliştirme prosesi; planlama, konsept geliştirme, sistem-düzye tasarımı, detaylı tasarım, deneme ve ayıklama, ve deneme üretimi aşamalarından oluşur. Ürün gelişim prosesi planlama aşaması ile başlar. Bu aşamanın çıktıları aynı zamanda konsept gelişim aşamasının girdisini oluşturmaktadır ve bu girdiler ürün geliştirme takımına yol göstermektedir. Ürün gelişim prosesinin son aşaması ürünün piyasaya sunulması

ve satın alınması için ürünün hazır hale getirilmesidir [5].

Müşteri memnuniyeti toplam kalite yönetiminin nihai hedefidir. Firmalar yüksek müşteri memnuniyetini başarmak için daha fazla bir şeyler sağlamalı ve tüm şikâyetleri elimine etmelidir [6]. Müşteri şikâyetlerinin, hata raporlarının az olması yüksek müşteri memnuniyeti olduğunu ifade etmemektedir. Müşteri isteklerini karşılamak için pazar araştırması yapılması gerekmektedir.

Pazar araştırmasının genel hedefleri aşağıdaki gibidir [7]:

1. Müşteri ihtiyaçlarını belirlemek
2. Mevcut müşteri memnuniyetini ölçmek
3. Müşteri devamlılık ve bağlılık durumlarını analiz etmek

Ersöz ve Aktepe [8] veri analizi ve analitik ağ sürecini KFY'de birleştirerek beyaz eşya üretimi yapan bir firmada incelemiştir. Onar vd. [9] tereddütlü bulanık sayı temelli KFY yöntemini bilgisayar iş istasyonu seçiminde kullanmışlardır. Çelik vd. [10] nakliye yatırım süreci için bulanık KFY metodunu incelemiştir. Huang vd. [11] tasarım konsept üretimi ve değerlendirmesinde bütünleşik bir yaklaşımı formüle etmek için genetik algoritma ve sinir ağlarıyla bulanık kümeleri birleştirdi. Ancak, önerilen yaklaşım karmaşık algoritma yapılarına ve uzun eğitim sürecine sahiptir. Ayağ ve Özdemir [12] bir yeni ürün geliştirme ortamında geliştirilen tasarım alternatiflerini değerlendirmek için AHP (analitik hiyerarşi prosesi)'nin daha genel biçimi ve analitik ağ sürecindeki bulanık mantığını sunmuştur. Shidpour vd. [13] kaba küme ve bulanık küme teorilerini birleştirerek tasarım konsept değerlendirmesi yapmışlardır. Efe vd. [5] ergonomik cep telefonu ürün konsept seçimi için sezgisel bulanık TOPSIS (technique for order preference by similarity to ideal solution) yöntemini incelemiştir. Xiao vd. [14] işbirlikçi tasarım ortamlarına oyun teorisini uyguladı ve çıktıdaki bazı öznellikleri nicelleştirmek için tasarım yeterlilik indislerini kullanmışlardır. Ayağ [15] yeni ürün geliştirmede konsept seçimi için dönüştürülmüş TOPSIS ve AAS (analitik ağ süreci) süreçlerini birleştirmiştir. Goswami vd. [16] tasarım konsept seçimi için KFY,

fonksiyonel analiz sistem tekniği ve AHP yaklaşımlarını kullanmışlardır. Han vd. [17] en iyi konsept seçimi için bayes ağı temelli yapay sinir ağları yaklaşımını sunmuşlardır.

Bu çalışmada kalite fonksiyon yayılımı yöntemi ve bulanık doğrusal programlama yaklaşımı ergonomik çamaşır makinesi tasarımı için önerilmiştir. Günümüzde çamaşır makinesi yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla çamaşır makinesi pazarı oldukça hareketlidir. Bu pazardan pay alabilmek için işletmeler büyük rekabet içerisindedir. Bu yüzden işletmeler müşteri isteklerine hızlı cevap verebilmelidir. Müşteriler bir çamaşır makinesi alırken birçok faktörü göz önünde bulundurmaktadır.

Müşterilerin önem verdiği konulardan birisi de ergonomik kullanım kolaylığıdır. Bu çalışmada ergonomik bir çamaşır makinesi tasarımı için hangi müşteri isteklerinin ve teknik özelliklerinin olduğu belirlenmiştir. Müşteri isteklerine göre teknik özellikler üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu bağlantıyı sağlayabilmek için kalite fonksiyon yayılımı tercih edilmiştir. Kalite fonksiyon yayılımı müşteri istekleri ve teknik özellikler arasındaki ilişkiyi belirleyebilmektedir. Ayrıca teknik özellikler arasındaki korelasyon ve müşteri istekleri arasındaki korelasyonu belirleyebilmektedir. Bu ilişki ve korelasyon değerlerinin normalize edilmesi sonucunda teknik özelliklerin önem dereceleri belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre ergonomik bir çamaşır makinesi tasarımı için hangi teknik özelliğin daha önemli olduğu belirlenmiştir. Ancak sadece bu sonuç sadece müşteri isteklerine göre belirlenmiştir. Firma bu istekleri karşılarken kendi kapasitesini de göz önünde bulundurmak zorundadır. Bu bakımdan firma ergonomik bir çamaşır makinesi tasarlarırken müşteri isteklerinin maksimize edilmesi, maliyetin düşürülmesi, zamanın minimize edilmesi gibi farklı amaçlara sahiptir. Müşteri isteklerini maksimize etmek için kalite fonksiyonu yayılımı sonucunda belirlenen teknik özelliklerin önem dereceleri ele alınmıştır. Maliyet minimizasyonu için teknik özelliklerin iyileştirilmesi sonucunda meydana gelecek maliyet incelenmiştir. Zaman minimizasyonu için teknik özelliklerin iyileştirilmesi için gerekli zaman incelenmiştir. Bu üç amaç fonksiyonunu eş zamanlı olarak incelemek için çok amaçlı matematiksel programlama yaklaşımından

yararlanılmıştır. Çok amaçlı programlama yaklaşımında bulanık mantık kavramı ele alınmıştır. Tiwari et al. [18] ve Zimmermann [19] tarafından önerilmiş olan bulanık çok amaçlı programlama yaklaşımı incelenmiş ve iki yaklaşımın sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma dört kısımdan oluşmaktadır. Çalışmada kullanılan yöntemler bölüm 2’de anlatılmıştır. Kalite fonksiyon yayılımı ve bulanık doğrusal programlama yaklaşımı bu kısımda anlatılmıştır. Üçüncü bölümde ergonomik çamaşır makinesi tasarımı için uygulama yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Son bölümde sonuç kısmı anlatılmıştır.

2. YÖNTEMLER (METHODS)

2.1. Kalite Fonksiyon Yayılımı (Quality Function Deployment)

Kalite Fonksiyon Yayılımı (KFY) ilk olarak 1972 yılında Japon Mitsubishi firması ile başlayıp, 1984’den sonra da ABD’de incelenen ve kullanılan ve bugün tüm dünyada kabul gören bir kalite tekniğidir. KFY, esas olarak müşteri isteklerini ölçülebilen performans değişikliklerine dönüştürüp, optimize edilmiş bir süreç ve iyi bir dağıtım/satış kanalı elde edilmesine yardımcı olan müşteri odaklı ve takım çalışmasını gerektiren bir kalite metodolojisidir [20,21].

Kalite fonksiyon yayılımı (KFY), tasarım gerekliliklerindeki (TG) müşteri istekleri (Mİ) belirleyen müşteri odaklı bir ürün geliştirme tekniğidir. KFY ürün geliştirme ve tasarımı, kalite yönetimi ve planlaması, karar verme, üretim, hizmet ve eğitim gibi birçok alanda uygulanmaktadır. Kalite fonksiyonu yayılımında kalite evi olarak adlandırılan ilişki matrisi, ilgili Mİ’nin performansına TG’nin etkisini gösteren Mİ ve TG arasındaki ilişki yoğunluğunu göstermektedir. Ayrıca her bir TG’nin arasındaki korelasyon ve her bir Mİ’nin arasındaki korelasyon kalite evinde gösterilmektedir. Kalite evinde belirtilen bilgiler kullanılarak tasarım ekibi maksimum müşteri memnuniyetini sağlamak için TG’lerin önceliklerini belirlemelidir.

Kalite fonksiyon yayılımı (KFY) ürün tasarım geliştirme sürecinde en önemli araçların biri olarak küresel kabul görmüştür. KFY’nin yapısından kaynaklanan problem yeterli önceliklendirme

stratejilerinden yoksun olmasıdır. Sınırlı kaynaklarla maksimum müşteri memnuniyetini kazanmak amacıyla optimizasyon teknikleri tasarım ve operasyonel süreçte kullanılan doğru ve güvenilir ürün parametrelerini sağlamak için KFY analizinde kullanılabilir [22]. KFY birçok sanayi sektöründe müşteri memnuniyetini iyileştirmek ve müşteri isteklerini karşılamak için yaygın olarak kullanılmaktadır [23]. KFY süreci kalite evi olarak bilinen birikimli matrisler sistemini kullanmaktadır. Bir eve benzeyen bu kavramsal harita, ürünü/hizmeti geliştirmeye yardım etmek için rekabetçi performans ve teknik özellikleri müşteri istekleriyle ilişkilendiren bilgiyi incelemektedir. Kalite evi, müşteri istekleri, müşteri öncelik oranları, ürün veya hizmet için gerekli teknik özellikler ve rekabetçilerle ilgili performans verisi arasındaki ilişkileri ölçmektedir [24]. Şekil 1 farklı birimlerden oluşan bir kalite evini göstermektedir [25]. Uygulayıcılar, final ağırlığı olarak bilinen toplam önem oranını belirlemek için bu birimlerdeki bilgileri birleştirirler. Final ağırlığı, müşteri memnuniyetine teknik özelliklerin katkısının öncelikliğini belirler. Şekil 1’de gösterilen A bölgesi müşteri istekleri arasındaki ilişkiyi, B bölgesi ise teknik özellikler arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Normalize edilmiş ilişki matris değerleri daha anlamlı gösterim vermek için kullanılırlar. Teknik özellikler ve müşteri istekleri arasındaki ilişkiyi hesaplayan m müşteri isteği ve n teknik özellik için Chen ve Chen [26] tarafından önerilen model aşağıda gösterilmiştir:

$$R_{ij}^{norm} = \frac{\left(\sum_{k=1}^n \gamma_{kj} \right) R_{ij}}{\sum_{j=1}^n \left(\sum_{k=1}^n \gamma_{kj} \right) R_{ij}} \quad (1)$$

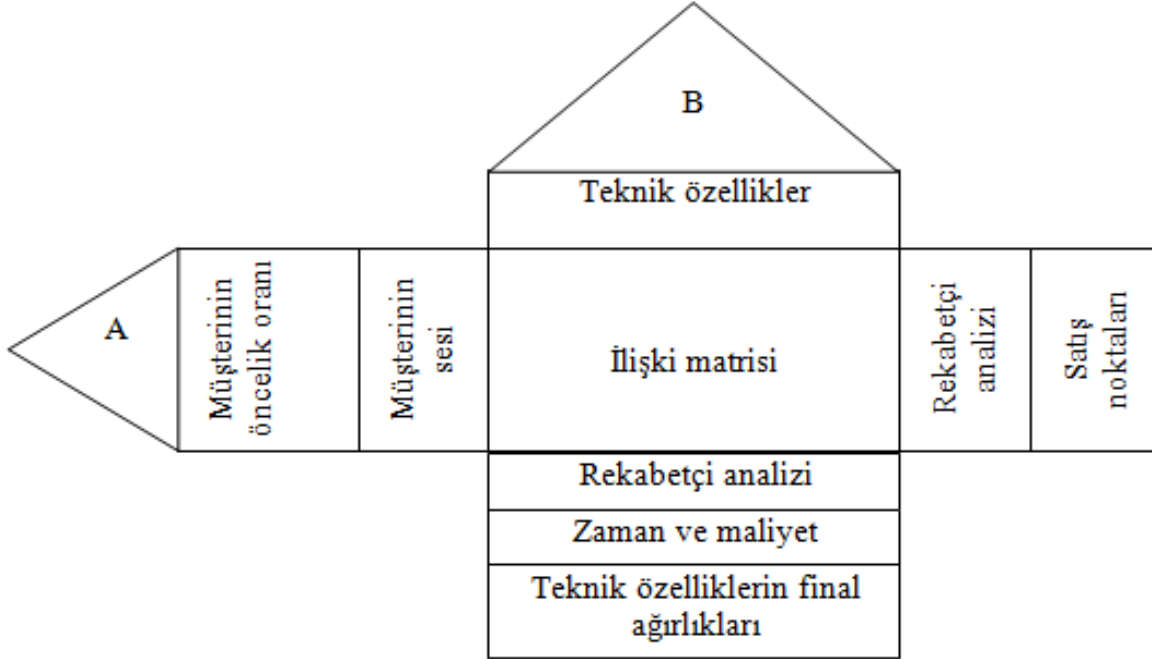
γ_{kj} , j. teknik özellik ve k. teknik özellik arasındaki korelasyon derecesini gösteren değerdir. R_{ik} , i. müşteri isteği ve k. teknik özellik arasındaki ilişki derecesini gösteren değerdir. R_{ij}^{norm} değeri ise j. teknik özellik belli seviyede karşılandığında i. müşteri isteğinin karşılanma seviyesindeki artan değişim olarak yorumlanabilir.

$$IR_i = \frac{\left(\sum_{l=1}^m \beta_{il} \right) d_i}{\sum_{i=1}^m \left(\sum_{l=1}^m \beta_{il} \right) d_i}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

β_{ij} , i. ve j. müşteri istekleri arasındaki korelasyon değeridir. d_i ise i. müşteri isteğinin önem derecesidir. Her bir teknik özelliğin skoru aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$AS_j = \sum_{i=1}^m R_{ij}^{norm} * IR_i, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

AS_j , j. teknik özelliğin mutlak skorudur. IR_i ise i. müşteri isteğinin korelasyonlu önem derecesidir. KFY'nin öncelikleri en yüksek skordan en düşük skora her bir teknik özelliğe artan sayıya göre atanarak elde edilebilir.



Şekil 1. Tipik bir kalite evi (A typical quality house)

2.2. Bulanık Doğrusal Programlama (Fuzzy Linear Programming)

Zimmermann [19] tarafından önerilen bulanık doğrusal programlama bulanık hedef ve bulanık kısıtlardan oluşmaktadır. Zimmermann [19] tarafından önerilen doğrusal programlama aşağıdaki gibidir:

$$\text{Minimize } Z = Cx \quad (4)$$

Kısıtlar;

$$Ax \leq b \quad (5)$$

$$x \geq 0 \quad (6)$$

Bulanıklaştırmadan sonra eşitlikler aşağıdaki gibi dönüştürülür:

$$\tilde{C} \lesssim Z \quad (7)$$

$$\tilde{A}x \lesssim b \quad (8)$$

$$x \geq 0 \quad (9)$$

\lesssim sembolü eşit veya daha küçük anlamındadır. \tilde{A} ve \tilde{C} bulanık sayıları ifade etmektedir.

3. UYGULAMA (APPLICATION)

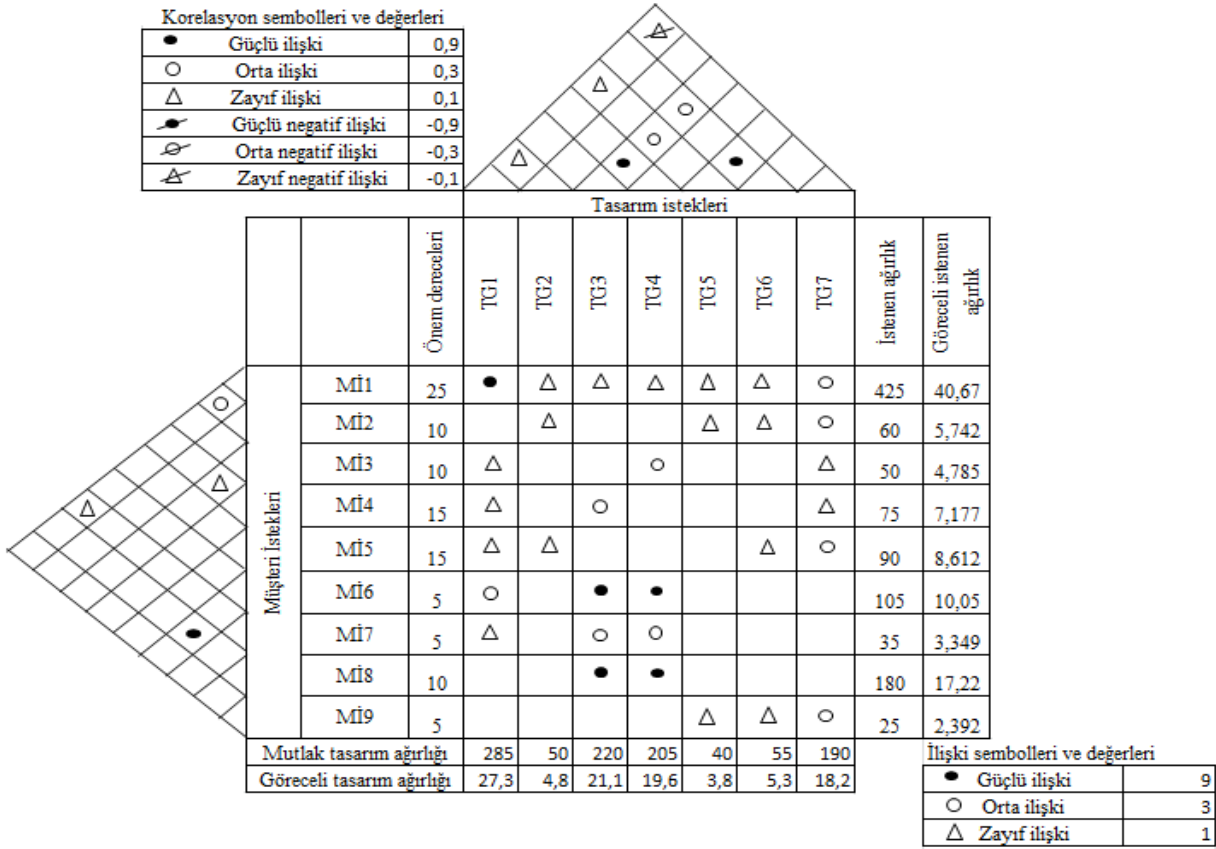
Ergonomik bir çamaşır makinesi tasarımı için 5 kişilik bir uzman komiteden ortak bir görüş alınmıştır. Uzman kişiler, çamaşır makinesini aktif olarak kullanan ve aynı zamanda çamaşır makinesi üretiminde çalışan mühendislerdir. Uzman grup ilk olarak ergonomik çamaşır makinesi için tasarım gereklilikleri ve müşteri isteklerini belirlemiştir. Daha sonra tasarım gereklilikleri arasındaki korelasyon, müşteri istekleri arasındaki korelasyon belirlenmiştir. Ayrıca tasarım gereklilikleri ve müşteri istekleri arasındaki ilişkiyi de belirlemiştir. Uzman grup müşteri isteklerinin önem derecelerini beyin fırtınası yoluyla değerlendirmiş ve ortak bir görüş olarak belirlemiştir.

Şekil 2'de görüldüğü gibi ergonomik bir çamaşır makinesi tasarlamak için kalite fonksiyon yayılımı kullanılmıştır. Ergonomik bir çamaşır makinesi için müşteri istekleri (Mİ) satın alma maliyeti (Mİ1), çalıştırma maliyeti (Mİ2), kurutma

performansı (Mİ3), yıkama performansı (Mİ4), güvenilirlik (Mİ5), geniş açıda yukarı açılabilen kapılar (Mİ6), otomatik ve güvenli kazan pozisyon ayarı (Mİ7), çamaşırın kolay doldurulması veya kazandan dışarı alınması (Mİ8), deterjan kutusu biçimi (Mİ9) olmak üzere 9 tanedir. Ergonomik bir çamaşır makinesi için tasarım gereklilikleri (TG) ise yükü belirleme (TG1), sertliği ölçme (TG2), kirli parçaları yükleme (TG3), temiz parçaları boşaltma (TG4), su doldurma (TG5), su boşaltma (TG6), yıkama (TG7) olmak üzere 7 tanedir. TG'ler kendi arasında korelasyon değerlerine,

Mİ'ler kendi arasında korelasyon değerlerine sahiptir. Korelasyon değerleri zayıf, orta, güçlü, zayıf negatif, orta negatif ve güçlü negatif olmak üzere 0.1, 0.3, 0.9, -0.1, -0.3 ve -0.9 olarak belirlenmiştir. TG'ler ve Mİ'ler arasında ilişki vardır.

İlişkiler zayıf, orta ve güçlü olmak üzere sırasıyla 1,3 ve 9 değerleri olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Ergonomik çamaşır makinesi için kalite fonksiyon yayılımı (Quality function deployment for an ergonomic washing machine)

Lyman normalizasyon modeli temelli KFY yaklaşımı sonucunda ergonomik bir çamaşır makinesi tasarlamak için teknik özelliklerin önem dereceleri belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 1'de gösterilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre TG'lerin sıralaması Tablo 1'deki gibi TG3> TG4> TG7> TG1> TG6> TG5> TG2 olarak belirlenmiş ve mutlak tasarım ağırlıkları sırasıyla 23.615, 20.235, 18.371, 17.166, 8.452, 6.236, 5.927 olarak belirlenmiştir.

Firma sadece KFY sonuçlarına göre ergonomik çamaşır makinesi tasarlırsa uzun dönemde bazı problemlerle karşılaşabilir. Çünkü firma zaman,

maliyet, müşteri memnuniyeti gibi bazı kısıtlamalara sahiptir. KFY sonucunda belirlenen en önemli teknik özellik ilk olarak ele alınırsa bu teknik özellik oldukça fazla zamana ve maliyete sebep olabilir. İşletme zaman ve maliyet açısından belirli bir kapasiteye sahip olduğu için bu kapasiteyi çok iyi kullanıp ergonomik çamaşır makinesi tasarımı hedefine ulaşmalıdır. Bir teknik özellik için ayrılan fazla maliyet ve zaman diğer teknik özellikler için ayrılan maliyet ve zamanı azaltacaktır. Bu problemlerin üstesinden gelmek için bu çalışmada çok amaçlı matematiksel programlama yaklaşımı önerilmiştir. Çok amaçlı matematiksel programlama için hibrid ve Zimmermann yaklaşımları incelenmiş ve iki farklı

yaklaşımın sonuçları karşılaştırılmıştır. Firma ergonomik çamaşır makinesi tasarımı için 60000 TL'lik bir bütçe ayırmıştır. Firmanın her bir TG'yi ele aldığı durumda gerekli olan maliyet ve zaman verileri Tablo 2'de sunulmuştur. Firma üç farklı

amacı eş zamanlı olarak incelemek istemektedir. Bu yüzden çok amaçlı matematiksel model önerilmiş ve eşitlikler (10)-(15) kullanılmıştır.

Tablo 1. KFY sonuçları (The results of quality function deployment)

		Önem dereceleri	Korelasyonlu önem dereceleri	DR1	DR2	DR3	DR4	DR5	DR6	DR7	İstenen ağırlık	Göreceli istenen ağırlık
Müşteri İstekleri	CR1	25	27,0	0,394	0,084	0,111	0,084	0,137	0,097	0,093	27,0	27,0
	CR2	10	10,0	0	0,145	0	0	0,145	0,275	0,435	10,0	10,0
	CR3	10	8,5	0,188	0	0	0,624	0	0	0,188	8,5	8,5
	CR4	15	12,7	0,188	0	0,624	0	0	0	0,188	12,7	12,7
	CR5	15	11,6	0,138	0,19	0	0	0	0,172	0,5	11,6	11,6
	CR6	5	7,3	0,08	0	0,46	0,46	0	0	0	7,3	7,3
	CR7	5	4,2	0,08	0	0,46	0,46	0	0	0	4,2	4,2
	CR8	10	14,7	0	0	0,5	0,5	0	0	0	14,7	14,7
	CR9	5	3,9	0	0	0	0	0,279	0,279	0,442	3,9	3,9
	Mutlak tasarım ağırlığı				17,166	5,927	23,615	20,235	6,236	8,452	18,371	
Göreceli tasarım ağırlığı				4	7	1	2	6	5	3		

Tablo 2. Firmanın belirlediği veriler (Data presented by the firm)

	TG1	TG2	TG3	TG4	TG5	TG6	TG7
Maliyet (TL)	10000	8000	12000	11000	14000	15000	16000
Zaman (Gün)	10	5	15	15	7	8	9

Tablo 3. Amaç fonksiyon değerlerinin alt ve üst sınırları (Upper and lower values of objective functions)

Z_1^-	Z_1^+	Z_2^-	Z_2^+	Z_3^-	Z_3^+
55.772	85.314	37000	57000	34	54

Notasyonlar:

n: Teknik özellik toplam sayısı

NRTIR_i: i. teknik özelliğin normalize edilmiş göreceli önem değeri

C_i: i. teknik özelliğin maliyeti

t_i: i. teknik özellik için gerekli süre

x_i: i. teknik özelliğin ele alınma durumu, 0-1 değişken

S_j: j. müşteri isteği için minimum memnuniyet seviyesi

R_{ij}: i. teknik özellik ve j. müşteri isteği arasındaki ilişkinin normalize değeri

$$\text{Maksimize } Z_1 = \sum_{i=1}^n \text{NRTIR}_i \cdot x_i \quad (10)$$

$$\text{Minimize } Z_2 = \sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \quad (11)$$

$$\text{Minimize } Z_3 = \sum_{i=1}^n t_i \cdot x_i \quad (12)$$

Kısıtlar

$$\sum_{i=1}^n C_i \cdot x_i \leq 50000 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^n R_{ij} \cdot x_i \geq S_j \quad \forall j \in MI \quad (14)$$

$$x_{1,2,3,4,5,6,7} = 0 \text{ veya } 1 \quad (15)$$

Yukarıdaki matematiksel model Z1 (teknik özelliklerin normalize edilmiş göreceli önem değerleri toplamı) amaç fonksiyonunu maksimize etmektedir. Böylece Z1 için üst sınır belirlenir. Aynı amaç fonksiyonu minimize edildiğinde Z1 için alt sınır belirlenir. Z2 (maliyet) ve Z3 (zaman) amaç fonksiyonlarını ise minimize etmektedir. Z1 için yapılan süreç Z2 ve Z3 için gerçekleştirilir. Çok amaçlı matematiksel modelin sonuçları GAMS (versiyon 22.5) yazılım paket programı yardımıyla belirlenir. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Ergonomik çamaşır makinesi tasarımı problemi için kesin formülasyon olarak Tiwari vd. [18] tarafından önerilen ağırlıklı eklemeli model (hibrid yaklaşım) kullanılır. Üç farklı amaç fonksiyonunun ağırlıkları karar vericilerin ortak görüşü olarak belirlenmiştir. Kesin formülasyonda amaç ve kısıtların üyelik fonksiyonlarının eklemeli değeri maksimize edilir. Amaç fonksiyonundaki λ_1 , λ_2 ve λ_3 değerleri Z1, Z2 ve Z3 amaç fonksiyonlarının üyelik derecesidir. λ , λ_1 , λ_2 ve λ_3 değerleri sırasıyla 0.67, 0.114, 0.95 ve 1.00 olarak bulunmuştur. Hibrid yaklaşım sonucunda TG1, TG3 ve TG7 teknik özelliklerinin ergonomik çamaşır makinesi tasarımı için ilk olarak ele alınması gerekli olduğu belirlenmiştir. Ergonomik çamaşır makinesi tasarımı problemi için ayrıca Zimmermann [19] tarafından önerilen yaklaşım kullanılır. Bu yaklaşımda tüm üyelik fonksiyonlarının ağırlıkları aynı incelenir. Zimmermann yaklaşımında λ tüm amaç fonksiyonları ve kısıtları için tüm üyelik fonksiyonu olarak belirlenir. Böylece λ (tüm üyelik fonksiyonu) maksimize edilir. GAMS

Hibrid yaklaşım

Maksimize $0.35\lambda_1 + 0.40\lambda_2 + 0.25\lambda_3$

Kısıtlar

$$\lambda_1 \leq \frac{(17.166x_1 + 5.927x_2 + 23.615x_3 + 20.235x_4 + 6.236x_5 + 8.452x_6 + 18.371x_7) - 55.772}{29.542}$$

$$\lambda_2 \leq \frac{57000 - (10000x_1 + 8000x_2 + 12000x_3 + 11000x_4 + 14000x_5 + 15000x_6 + 16000x_7)}{20000}$$

$$\lambda_3 \leq \frac{54 - (10x_1 + 5x_2 + 15x_3 + 15x_4 + 7x_5 + 8x_6 + 9x_7)}{20}$$

$$(10000x_1 + 8000x_2 + 12000x_3 + 11000x_4 + 14000x_5 + 15000x_6 + 16000x_7) \leq 60000$$

$$(0.394x_1 + 0.084x_2 + 0.111x_3 + 0.084x_4 + 0.137x_5 + 0.097x_6 + 0.093x_7) \geq 0.35$$

$$(0.145x_2 + 0.145x_5 + 0.275x_6 + 0.435x_7) \geq 0.35$$

$$(0.188x_1 + 0.624x_4 + 0.188x_7) \geq 0.35$$

$$(0.188x_1 + 0.624x_3 + 0.188x_7) \geq 0.35$$

$$(0.138x_1 + 0.19x_2 + 0.172x_6 + 0.5x_7) \geq 0.35$$

$$(0.08x_1 + 0.46x_3 + 0.46x_4) \geq 0.35$$

$$(0.5x_3 + 0.5x_4) \geq 0.35$$

$$(0.279x_5 + 0.279x_6 + 0.442x_7) \geq 0.35$$

$$\lambda_{1,2,3} \in [0,1]$$

$$x_{1,2,3,4,5,6,7} = 0 \text{ veya } 1$$

Müşteri memnuniyeti kısıtlarında müşteri 6 ve 7'nin aynı eşitliğe sahip olmasından dolayı

(versiyon 22.5) yazılım paket programı yardımıyla hibrid ve Zimmermann yaklaşımlarının sonuçları belirlenmiş ve Tablo 4'te sunulmuştur. λ değeri ise 0.419 olarak belirlenmiştir. Zimmermann yaklaşımı sonucunda TG2, TG3, TG4 ve TG7 teknik özelliklerinin ergonomik çamaşır makinesi tasarımı için ilk olarak ele alınması gerekli olduğu belirlenmiştir. Her iki yaklaşımda TG3 ve TG7 teknik özelliklerinin ele alınması gerektiği belirlenmiştir. KFY sonucunda teknik özelliklerin göreceli önem derecesine göre en önemli teknik özellik TG3 olarak belirlenmiştir. Firmanın kapasitelerine göre çok amaçlı matematiksel programlama hibrid ve Zimmermann olmak üzere iki farklı yaklaşımla incelenmiş ve her ikisinde de TG3 önemli bir teknik özellik olarak belirlenmiştir. TG7 ise KFY sonucunda 3. sırada iken matematiksel modellere göre her ikisinde de yer almıştır. Hâlbuki TG4 KFY sonucunda 2. sırada iken hibrid yaklaşımda ele alınmamıştır. Çünkü firmanın kapasitesiyle ilgili bir kısıtlama söz konusu olmuş olabilir.

matematiksel modelde tek bir eşitlik olarak gösterilmiştir.

*Zimmermann yaklaşım*Maksimize λ

Kısıtlar

$$\lambda \leq \frac{(17.166x_1 + 5.927x_2 + 23.615x_3 + 20.235x_4 + 6.236x_5 + 8.452x_6 + 18.371x_7) - 55.772}{29.542}$$

$$\lambda \leq \frac{57000 - (10000x_1 + 8000x_2 + 12000x_3 + 11000x_4 + 14000x_5 + 15000x_6 + 16000x_7)}{20000}$$

$$\lambda \leq \frac{54 - (10x_1 + 5x_2 + 15x_3 + 15x_4 + 7x_5 + 8x_6 + 9x_7)}{20}$$

$$(10000x_1 + 8000x_2 + 12000x_3 + 11000x_4 + 14000x_5 + 15000x_6 + 16000x_7) \leq 60000$$

$$(0.394x_1 + 0.084x_2 + 0.111x_3 + 0.084x_4 + 0.137x_5 + 0.097x_6 + 0.093x_7) \geq 0.35$$

$$(0.145x_2 + 0.145x_5 + 0.275x_6 + 0.435x_7) \geq 0.35$$

$$(0.188x_1 + 0.624x_4 + 0.188x_7) \geq 0.35$$

$$(0.188x_1 + 0.624x_3 + 0.188x_7) \geq 0.35$$

$$(0.138x_1 + 0.19x_2 + 0.172x_6 + 0.5x_7) \geq 0.35$$

$$(0.08x_1 + 0.46x_3 + 0.46x_4) \geq 0.35$$

$$(0.5x_3 + 0.5x_4) \geq 0.35$$

$$(0.279x_5 + 0.279x_6 + 0.442x_7) \geq 0.35$$

$$\lambda \in [0,1]$$

$$x_{1,2,3,4,5,6,7} = 0 \text{ veya } 1$$

Tablo 4. Hibrid ve Zimmermann yaklaşımlarının karşılaştırması (Comparison of Hybrid and Zimmermann approaches)

Amaç fonksiyonu	Hibrid yaklaşım	Zimmermann yaklaşımı
Z ₁	59.152	68.147
Z ₂	38000	47000
Z ₃	34	44

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Müşteri istekleri çok hızlı bir şekilde değişmektedir. Bu yüzden firmaların müşteri isteklerine hızlı ve doğru biçimde cevap verebilmesi firmaların pazarda yer alabilmeleri için oldukça önemlidir. Bu çalışmada kalite fonksiyon yayılımı yöntemi ve bulanık çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımı ergonomik çamaşır makinesi tasarımı için önerilmiştir. Bu çalışma ergonomik bir çamaşır makinesi tasarımı için Chen ve Chen [26] tarafından önerilen kalite fonksiyon yayılımı yöntemini kullanmıştır. Sadece müşteri isteklerine göre bir ürün tasarımı yapmak firmanın kapasitesiyle uyumlayabilir. Firma sadece KFY sonuçlarına göre ergonomik çamaşır

makinesi tasarlırsa uzun dönemde bazı problemlerle karşılaşabilir. Çünkü firma bu tasarım için belli zaman ve bütçeye sahiptir. KFY sonucunda belirlenen en önemli teknik özellik ilk olarak ele alınırsa bu teknik özellik oldukça fazla zamana ve maliyete sebep olabilir. İşletme zaman ve maliyet açısından belirli bir kapasiteye sahip olduğu için bu kapasiteyi çok iyi kullanıp ergonomik çamaşır makinesi tasarımı hedefine ulaşmalıdır. Bir teknik özellik için fazladan ayrılan maliyet ve zaman diğer teknik özellikler için ayrılan maliyet ve zamanı azaltacaktır. Bu yüzden birçok amacı eş zamanlı olarak incelemek zorundadır. Bu yüzden bulanık çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımını ele almıştır. Bulanık kavramı amaç fonksiyonları ve kısıtlarda kullanılmıştır. Bulanık çok amaçlı matematiksel programlama için hibrid ve Zimmermann yaklaşımları incelenmiş ve iki farklı yaklaşımın sonuçları karşılaştırılmıştır.

Literatürde ergonomik özellikleri dikkate alınan bir çamaşır makinesi tasarımıyla ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma müşteri memnuniyetini en iyi şekilde yerine getirmek için KFY yaklaşımdan faydalanmıştır. Böylece



müşteri istekleri temelinde hangi teknik özelliklerde iyileştirme yapılması gerektiği belirlenmiştir. KFY sonucuna göre en önemli teknik özellikler sırasıyla kirli parçaları yükleme, temiz parçaları boşaltma, yıkama, yükü belirleme, su boşaltma, su doldurma ve sertliği ölçme olarak belirlenmiştir. KFY sonucunda sadece müşteri istekleri ele alınmış firmanın kapasitesi dikkate alınmamıştır. Firma kapasitesi ve müşteri gereksinimlerini birlikte ele almak için bulanık çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımı önerilmiştir. Hibrid yaklaşım sonucuna göre kirli parçaları yükleme, yıkama ve yükü belirleme teknik özellikleri belirlenmiştir. Zimmermann yaklaşım sonucuna göre kirli parçaları yükleme, temiz parçaları boşaltma, yıkama ve sertliği ölçme teknik özellikleri belirlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda bütünleşik kalite fonksiyon yayılımı yöntemi ve bulanık çok amaçlı doğrusal programlama yaklaşımı farklı ürün tasarım problemleri için incelenebilir. Ayrıca KFY yönteminde bulanık mantık yaklaşımı incelenerek çalışma genişletilebilir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Yung, K. L., Ko, S. M., Kwan, F. Y., Tam, H. K., Lam, C. W., Ng, H. P., Lau, K. S., Application of function deployment model in decision making for new product development. *Concurrent Engineering Research and Applications*, 14(3), 257-267, 2006. Yung, K.L.,
- [2] Schilling, M. A., ve C. W. Hill. 1998. "Managing the New Product Development Process: Strategic Imperatives." *The Academy of Management Executive*, 12 (3): 67-81, 1998.
- [3] Yan, H.B., Ma, T., A fuzzy group decision making approach to new product concept screening at the fuzzy front end. *International Journal of Production Research*, 53(13), 4021-4049, 2015.
- [4] Ozer, M. "Factors which Influence Decision Making in New Product Evaluation." *European Journal of Operational Research*, 163: 784-801, 2005.
- [5] Efe, B., Boran, F.E., Kurt M. "Sezgisel Bulanık TOPSIS Yöntemi Kullanılarak Ergonomik Ürün Konsept Seçimi." *SDÜ Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi* 3(3), 433-440, 2015.
- [6] Kondo, Y., Customer satisfaction: How can I measure it? *Total Quality Management*, 12(7), 867-872, 2001.
- [7] Gryna F. M. Quality planning and analysis: from product development through use. *McGraw-Hill*, New York, 2001.
- [8] Ersöz, S., Aktepe, A. An application of data envelopment analytic network process (DEANP) in quality function deployment (QFD), *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(2), 401-413, 2011.
- [9] Onar, S. Ç., Büyüközkan, G., Öztayşi, B., Kahraman, C. A new hesitant fuzzy QFD approach: An application to computer workstation selection, *Applied Soft Computing Journal*, 46, 1-16, 2016.
- [10] Celik, M., Cebi, S., Kahraman, C., Er, I.D. An integrated fuzzy QFD model proposal on routing of shipping investment decisions in crude oil tanker market, *Expert Systems with Applications*, 36 (3 PART 2), 6227-6235, 2009.
- [11] Huang, H.Z., Bo, R.F., ve Chen, W. An integrated computational intelligence approach to product concept generation and evaluation. *Mechanism and Machine Theory*, 41(5), 567-583, 2006.
- [12] Ayağ, Z. ve Özdemir, R.G. A hybrid approach to concept selection through fuzzy analytic network process. *Computers and Industrial Engineering*, 56(1), 368-379, 2009.
- [13] Shidpour, H., Da Cunha, C., Bernard, A. Group multi-criteria design concept evaluation using combined rough set theory and fuzzy set theory, (2016) *Expert Systems with Applications*, 64, 633-644.
- [14] Xiao, A., et al. Collaborative multidisciplinary decision making using game theory and design capability indices. *Research in Engineering Design*, 16 (1-2), 57-72, 2005.
- [15] Ayağ, Z. An integrated approach to concept evaluation in a new product development. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 27(5), 991-1005, 2016.

- [16] Goswami, M., Singh, J., & Kumar, V. An enterprise based decision support system for engineering aggregate selection: a case study. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 14(4), 2016.
- [17] Han, S., Seo, S., & Choi, H. J. (2015). A study on modeling customer preferences for conceptual design. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(12), 5083-5091.
- [18] Tiwari, R. N., Dharmahr, S., & Rao, J. R. Fuzzy goal programming-an additive model. *Fuzzy Sets and Systems*, 24(1), 27-34, 1987.
- [19] Zimmermann, H. J. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions, *Fuzzy Sets and Systems*, 1(1), 45-55, 1978.
- [20] Sevük, A. Kaynak Elektrodu Üretiminde Kalite Fonksiyon Açılımı (QFD) Yaklaşımına Bir Örnek. *Tüsiad-Kalder 7. Ulusal Kalite Kongresi, Tebliğler ve Özgeçmişler*, İstanbul, s. 133-160, 1998.
- [21] Güllü, E., Ulcay, Y. Kalite Fonksiyonu Yayılımı ve Bir Uygulama, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1), 71-91, 2002.
- [22] Raharjo, H., Xie, M., Brombacher, A.C., Prioritizing quality characteristics in dynamic quality function deployment. *International Journal of Production Research*, 44(23), 5005-5018, 2006.
- [23] Chan LK, Wu M. L. Quality function deployment: a literature review. *Eur J Oper Res*, 143:463-497, 2002.
- [24] Iqbal, Z., Grigg, N.P., Govindaraju, K., Campbell- Allen, N.M. A distance-based methodology for increased extraction of information from the roof matrices in QFD studies. *International Journal of Production Research*, 54 (11), 3277- 293, 2016.
- [25] Griffin, A., and J. R. Hauser. "The Voice of the Customer." *Marketing Science*, 12(1), 1-27, 1993.
- [26] Chen, L. H., Chen, C. N. Normalisation models for prioritising design requirements for quality function deployment processes. *International Journal of Production Research*, 52(2),299-313, 2014.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 02-03-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 26-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.296064	

Ark sprej tekniği ile özlü tel kullanılarak üretilen farklı iki tür kaplamanın aşınma davranışının incelenmesi

Ahmet Sefa Atalay^{*1}, Fatih Üstel, Ekrem Altuncu, Enver Terzi

ÖZ

Ark sprej tekniği ile üretilen kaplamalar öncelikli olarak korozyon ve aşınma direnci gerektiren uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Daha yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalar için özlü teller aşınma plakalarına alternatif olarak tercih edilmektedir. Bu çalışmada, ark püskürtme tekniği ile çelik (St 52) altlıkların üzerine Fe-Cr esaslı ve yüksek karbür içeriğine sahip ticari özlü tellerden kaplamalar üretilmiştir. Üretilen kaplamalar ASTM G133-05 standardına uygun olarak farklı yük ve aşınma mesafelerinde test edilmiştir. Kaplama karakterizasyonu sonrasında aşınma yüzeyleri ve aşınma kayıpları karşılaştırılmıştır. Aşınma testlerinin sonucunda özlü teller ile kaplama yapmanın aşınma direncini önemli oranda arttırdığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ark sprej, Özlü tel, Aşınma davranışı, Mikroyapısal karakterizasyon

Investigation of wear behavior of two different types coatings by using cored wire with arc spray technique

ABSTRACT

Coatings produced by arc spray technique are used primary in applications requiring corrosion and wear resistance. Cored wires are preferred as alternative to wear plates for applications where higher wear resistance is desired. In this work, coatings from commercial cored wire with Fe-Cr based and high carbide content on steel (St 52) substrates with arc spraying technique have been produced. The produced coatings have been tested at different load and wear distances in accordance with ASTM G133-05 standard. Wear surfaces and wear losses were compared after coating characterization. As a result of the wear tests, it has been determined that coating with core wires increases wear resistance considerably.

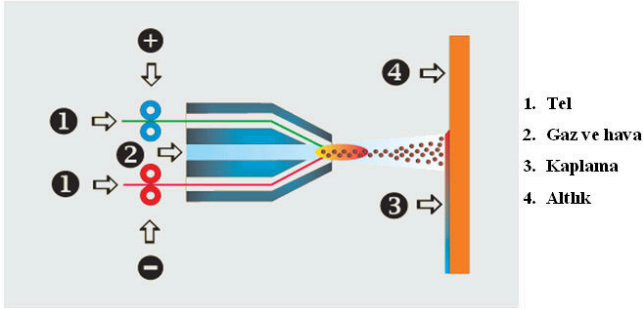
Keywords: Arc spray, Cored wire, Wear behavior, Microstructural characterization

^{*} Sorumlu yazar / Corresponding Author

¹ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü asatalay92@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Termal sprey kaplama yöntemleri arasında ark sprey tekniği en pratik ve ekonomik proseslerden bir tanesi olmakla birlikte oldukça yüksek birikme oranlarına sahiptir. Ark sprey kaplama yönteminde elektriksel iletkenliğe sahip iki tel sprey tabancasının ucunda oluşturulan ark enerjisi ile ergiyik dropletler (damlacıklar) haline getirilmekte ve yüksek basınç etkisi ile atomize halde altlık malzeme yüzeyine hızla püskürtülmektedir. Hızlı bir katılaşma ile yüzeyde birbiri üzerinde biriken lamelsi tabakalar (splatlar) halinde 100 µm ile 1000 µm aralığında heterojen (mikroyapısal süreksizliklere sahip) bir kaplama tabakası elde edilmektedir. Bu proseste yalnızca elektriksel iletkenliğe sahip aynı tür veya farklı metalik esaslı teller kullanılabilir. Çinko, alüminyum, bakır alaşımı teller (1,6 mm) gerek korozyon gerekse tribolojik uygulamalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Genellikle geniş metal yüzeylerde koruma, tamir, dolgu, toleransa getirme ve ömür arttırma amacıyla tercih edilmektedir [1-4].



Şekil 1. Ark sprey prosesinin şematik görünümü [5].

Yüksek gerilme ve aşınma şartlarına maruz kalan iş parçası yüzeyleri için kaplamanın yeterli sertliğe sahip olması amacıyla özlü teller geliştirilmiştir. Metalik bir tüp veya boru içerisine sert partiküller (karbür veya nitrür bileşikleri) sıkıştırılmak suretiyle aşınmaya dirençli özlü teller kullanılabilir. Genellikle uygulama amacına bağlı olarak farklı kompozisyonlarda ve boyutlarda karbür esaslı partiküller (WC, TiC, Cr₂C₃, vb.) içeren özlü teller ticari olarak temin edilebilmektedir. Bu sayede özlü teller kullanılarak elde edilen kaplamalar ticari aşınma plakalarına alternatif ekonomik bir çözüm sunmaktadır. Bu kaplamalar; katı partikül aşınma, erozif aşınma, kaymalı aşınma ve yüksek gerilme altındaki aşınma uygulamalarında (karıştırıcılar, kırıcılar, taşıyıcılar, kazıyıcılar vb.) kullanım alanı kazanmıştır. Öz malzemesinin etrafındaki metalik

tüp veya boru, arkın oluşumuna imkan vermekte ve de sert öz partiküllerin homojen bir şekilde ergimesine ve kaplama ana yapısında sert faz halinde elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Bir anlamda metal matrisli sert partikül (karbür, nitrür, borür) takviyeli aşınmaya dirençli bir kompozit (sermet) kaplama elde edilmektedir. Kaplama kompozisyonundaki sert faz oranı ve matris ile uyumu kaplamanın performansını belirlemektedir [6-9].

Bu çalışma kapsamında ticari olarak temin edilen iki farklı özlü tel kompozisyonu ark sprey tekniği ile çelik altlık üzerine kaplanmış ve kaplamaların aşınma performansları ASTM G133-05 standardı doğrultusunda karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Özlü tellerden üretilen kaplamaların mikroyapısal karakterizasyonu elektron mikroskobu ile incelenirken mekanik özellikleri ise mikrosertlik test ünitesi ile incelenmiştir. Ayrıca aşınma davranışı ise aşınma kaybı ölçümleri ve aşınma sonrası aşınma izlerinin mikroskobik karakterizasyonu ile incelenmiştir.

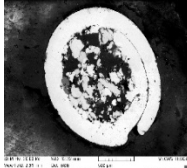
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Kaplama İşlemi (Spray Process)

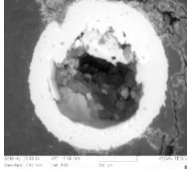
İlk olarak 4 mm kalınlığındaki St 52 (DIN2391) çeliğinden imal edilen plakaların (10 x 10 cm) yüzeyleri kumlama işlemi ile (6 bar, Alümina 80-100 mesh) pürüzlendirilmiştir. Pürüzlendirme işlemi kaplama esnasında dropletlerin (damlacıkların) yüzeye tutunmasını artırmaktadır. Homojen bir yüzey pürüzlülüğü (4µm) elde edildikten sonra kaplama işlemi için numune, tutucuya sabitlenmiştir. Kaplama işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk olarak altlık yüzeyine ana kaplama uygulanmadan önce kaplamanın altlık ile daha iyi bir yapışma sağlaması için bir bağ tabaka (Ni-Al esaslı) uygulanmıştır. Bağ tabaka sonrasında ise Fe-Cr esaslı ve yüksek karbürü özlü teller ile iki farklı tür kaplama biriktirilmiştir. Tablo 1 de kaplamalarda kullanılan özlü tellerin kimyasal kompozisyonları ve ön kesit SEM görüntüleri sergilenmektedir. Metalik bir kılıf içerisinde sert partiküller açıkça görülebilmektedir. Her iki kaplama uygulaması da Sulzer Metco Smart Arc kaplama ünitesinde gerçekleştirilmiş ve Tablo 2'de sprey parametreleri sunulmuştur. Kaplamalar manuel olarak uygulanmıştır.

Tablo 1. Deneysel çalışmada kullanılan özlü tellerin kompozisyonu.

Fe-Cr esaslı özlü tel (% ağırlıkça)				
C	Cr	Mn	Si	Fe
0,30	13,0	1,0	1,0	84,7



Yüksek karbürlü özlü tel (% ağırlıkça)							
Fe	Cr	Ni	Si	Mn	WC	B	Ti ₂ C ₃
45,7	14	4,5	1,3	0,6	26	1,9	6



Tablo 2. Özlü teller için kullanılan püskürtme parametreleri.

Parametreler	Ni-Al esaslı bağ tabaka	A1:Fe-Cr esaslı özlü tel kaplama	A2:Yüksek karbürlü özlü tel kaplama
Püskürtme akımı (A)	200	220	190
Voltaj (V)	30	28	29
Atomizasyon gaz basıncı (bar)		4,5	
Püskürtme mesafesi (cm)	15-20	15-20	7-10
Paso sayısı	2-5	15	10

2.2. Kaplamalara Uygulanan Testler Ve Analizler (Tests And Analysis For Coatings)

Kaplamaların mikroyapısal incelemelerinde standard metalografik işlemler (400-800-1000 grit zımpara-3µm elmas partlatma) sonrasında elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları ile kaplama üst yüzey ve kesit mikroyapıları incelenmiştir. Kaplamaların mikrosertlik testleri vickers sertlik (HV0,3) ölçümü ile 300 gr yük uygulanarak 10 sn süre ile gerçekleştirilmiştir. Her numuneden 6 ölçüm alınarak ortalama sertlik belirlenmiştir. Aşınma testleri ASTM G133-05 standardı doğrultusunda 500 gr ve 2000 gr yük altında 100 m ve 500 m aşınma mesafelerinde ağırlık kaybı ölçümleri (0,001 gr hassasiyetli) ve aşınma izi incelemeleri ile gerçekleştirilmiştir.

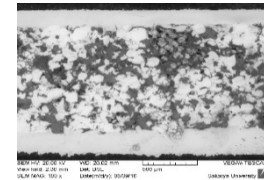
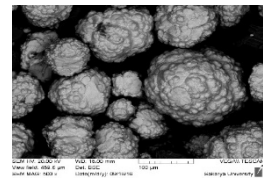
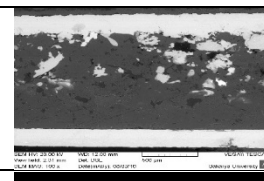
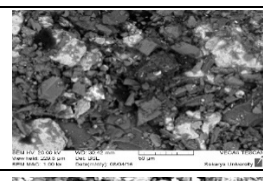
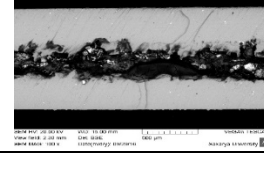
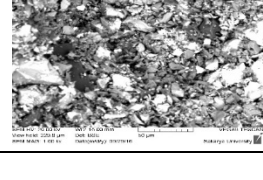
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Kaplama Telleri Ve Öz Partiküllerin Karakterizasyonu (Wires And Cored Particles Characterization)

Bağ tabakada kullanılan Ni-Al esaslı (125 TW) özlü tel ile üst tabakada kullanılan Fe-Cr esaslı (446 TW) ve yüksek karbürlü (SP 106) özlü

tellerden (dış çap 1.6 mm, et kalınlığı 0,25 mm) bakalite alınıp metalografik numune hazırlama işlemleri yapıldıktan sonra elektron mikroskobunda tel kesitleri ve öz partikülleri SEM-EDX ile karakterize edilmiştir. Tablo 3'de görüleceği üzere bağ tabaka özlü tel içerisinde küresel formda (50-100µm) metalik esaslı partiküller gözlemlenmiştir. Buna karşın sert tabaka için kullanılacak özlü tel kesitinde ise karmaşık şekilli, köşeli 5-50µm aralığında homojen bir boyut dağılımına sahip olmayan sert partiküller gözlemlenmiştir.

Tablo 3. Kullanılan özlü tellere ait kesit ve öz kısmına ait SEM görüntüleri.

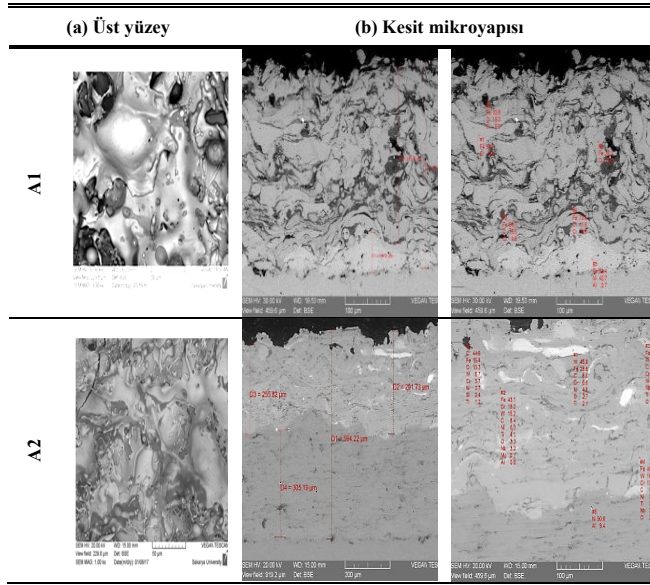
Özlü Tel Yan Kesit SEM Görüntüsü	Özlü Telin İçerisindeki Partiküller SEM-BSE mod	Açıklama
		Ni-Al esaslı özlü telin içerisindeki özler küresel formda olup ortalama partikül boyutu +50-100 µm ölçülmüştür.
		Fe-Cr esaslı özlü telin içerisindeki özler karmaşık şekilde olup ortalama partikül boyutu +5-50 µm ölçülmüştür.
		Yüksek karbürlü özlü telin içerisindeki özler karmaşık şekilde olup ortalama partikül boyutu +5-50 µm ölçülmüştür.

3.2. Kaplamaların Mikroyapısal Analizleri (Microstructural Analysis of Coatings)

Üretilen kaplamaların taramalı elektron mikroskobunda (SEM) kalınlıkları ölçülmüş ve EDX ile element analizleri yapılmıştır. Bunların yanı sıra kaplamaların üst yüzey ve kesit bölgelerinden SEM görüntüleri alınmıştır. Bu çalışmada 2 farklı tür özlü tel ile çelik yüzeyde sert bir kaplama tabakası elde edilmiştir: A1: St 52 altlık/ Ni-Al bağ tabaka/üst tabakada Fe-Cr esaslı özlü tel ile yapılan kaplama, A2: St 52 altlık Ni-Al bağ tabaka /üst tabakada yüksek karbürlü özlü tel ile yapılan kaplamayı temsil etmektedir (Tablo 1 ve 2).

Şekil 2'de kaplamaların üst yüzey ve kesit SEM görüntüleri verilmiştir. Üst yüzey görüntülerinde ergimiş partiküllerin splat formları, kesit görüntülerinde ise lamel yapıları açıkça

görülmektedir. Kaplama üst yüzey görüntülerinde splatların yayılımına bağlı olarak sprey parametrelerinin yeterli ergime ve kinetik enerjisini sağladığı anlaşılmaktadır. Bununla birlikte kaplamanın kesit görüntülerine bakıldığında kaplama yapısında farklı boyutlarda makro poroziteler, oksitler olduğu tespit edilmektedir. Bu tür kaplamalarda atomizasyon gazı olarak havanın kullanılması dropletin oksitlenmesine neden olmaktadır. Bu durum splatlar arasında oksitlerin varlığına neden olmaktadır. Oksit oranı kaplamanın sertlik artışına neden olurken, splatlar arasında ise arayüzey yapışma özelliklerini olumsuz etkileyebilmektedir. A1 kaplama kalınlığının ölçüldüğü kesit SEM görüntüsüne bakıldığında yaklaşık 60 µm bağ, 243 µm üst tabaka ve ortalama 287±20 µm kaplama kalınlığının olduğu görülmüştür. A2 kaplamasında ise 305 µm bağ tabakası, yaklaşık 292 µm üst tabaka ve ortalama 594±30 µm kaplama kalınlığının olduğu görülmüştür. A2 kaplamasının A1 kaplamasına göre daha yoğun düşük poroziteye sahip olduğu ve daha düşük oranda oksit içerdiği görülmüştür.



Şekil 2. A1 ve A2 kaplamasına ait (a) üst yüzey SEM görüntüleri (b) kesit bölgesinden alınan kaplama kalınlıkları, EDX analizleri ve üst tabakaya ait lamel yapılarını gösteren SEM görüntüleri.

3.3. Kaplamaların Sertlik Ölçüm Sonuçları (Hardness Measurement Results of The Coatings)

DeneySEL çalışmalarda kaplamanın sertliği aşınma performansı açısından önemli bir kriterdir. Bu amaçla hem altlık hem bağ tabaka hem de üst kaplama tabakasının sertlikleri ölçülmüştür. Altlık malzemesi olarak kullanılan St 52 çeliğin sertliği ortalama 180±10 HV'dir. Bağ tabakanın ise 230

HV'dir. Kaplamalardan elde edilen mikrosertlik değerleri Tablo 4'de verilmiştir. Sertliğin altlık tabakasından yukarı doğru kademeli olarak tabaka kompozisyonuna bağlı bir şekilde arttığı görülmektedir. A2 kaplaması gerek mikroyapısal özellikleri gerekse kaplama kompozisyonu nedeniyle daha yüksek bir sertlik değeri (700 HV) sergilemiştir. A1 kaplama ise nispeten daha düşük bir sertliğe sahiptir (400 HV). Her iki kaplama da altlığa göre oldukça yüksek sertliğe sahiptir. İki farklı kaplama kompozisyonu içerisinde karbür fazın dağılımı ve oranı sertlik artışında önemli bir fark oluşturmaktadır.

Tablo 4. Altlık ve kaplamaların sertlik değerleri.

Sertlik Ölçümleri	Bağ tabaka (Ni-Al)	A1 (Fe-Cr)	A2 (Yüksek karbürü)
1	236	411	678
2	245	407	713
3	221	390	708
4	248	452	690
5	235	387	715
6	225	395	736
Ortalama	235±15	407±25	706,6±30

3.4. Kaplamaların Aşınma Testi (Wear Test of Coatings)

Kaplamalar, ASTM G133-05 standardına uygun tasarlanmış test cihazında hareketli tabla üzerine sırayla teker teker tutturulmuştur. Tablanın ileri geri şeklindeki hareketine bağlı olarak kaplamanın yüzeyine temas eden küresel aşındırıcı (ball on flat) ile aşınma mekanizması sağlanarak testler gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde kullanılmak üzere her bir kaplama türünden ikişer tane toplamda dört adet 30x35 mm kenar uzunluklarında aşınma numuneleri hazırlanmıştır. Aşınma numuneleri, ilgili standarda uygun olarak farklı yük ve aşınma mesafelerinde test edilmiştir. Seçilen yükler: 0,5 ve 2 kg olup, 100 metre aşınma mesafesi için 80 dakika, 500 metre aşınma mesafesi için 400 dakika süre ile test edilmiştir. Aşınma testlerinde kullanılan ZrO₂ (HV:2000) bilye her test sonrası tartılmış olup ağırlığı 1,5283 gram olarak sabit bir şekilde değişmeden kaldığı tespit edilmiştir. Yapılan EDX analizlerinde de yüzeyde herhangi bir Zr elementine rastlanmaması bilyeden kaplamaya partikül geçmediği sonucunu güçlendirmiştir.

Kullanılan özlü tellerin aşınma dayanımına etkisi, aşınma kaybı ölçümleri ile karşılaştırmalı olarak

belirlenmiştir. Tablo 5’de aşınma kaybı sonuçları sunulmuştur.

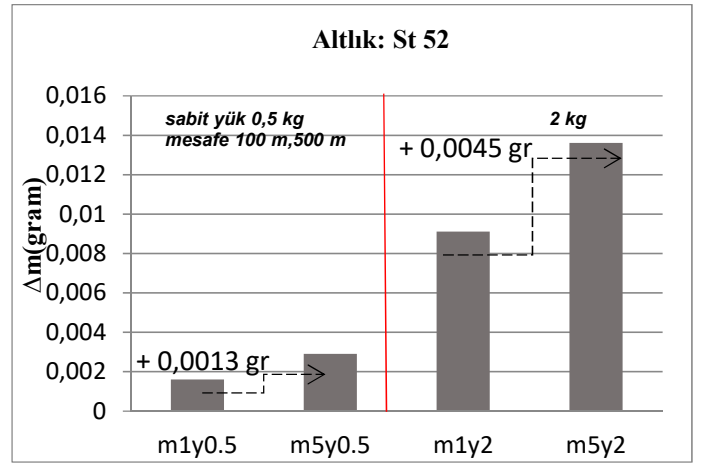


Şekil 3. ASTM G133-05 standardına uygun ball-on-flat aşınma test cihazı

Tablo 5. Aşınma testi sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları.

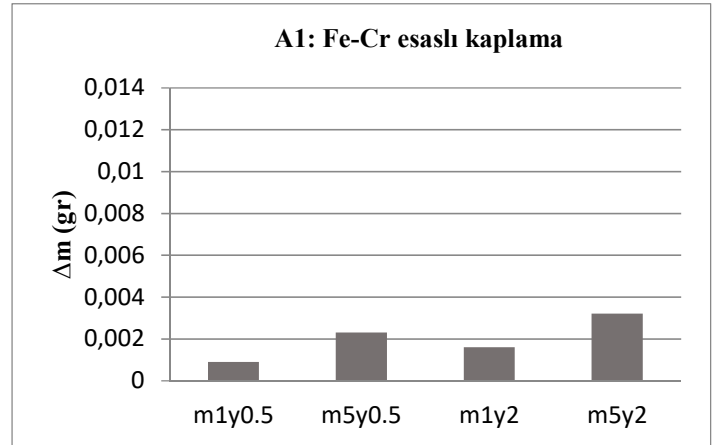
Altık ve kaplamalar	Yük (kg)	Mesafe (m)	Kod	m1:İlk ağırlık	m2:Son ağırlık	Δm : m1-m2	% Değişim
				(Gram)	(Gram)		
St 52	0,5	100	m1y0.5	36,8508	36,8492	0,0016	0,0043
	0,5	500	m5y0.5	36,8492	36,8463	0,0029	0,0079
	2	100	m1y2	39,9366	39,9275	0,0091	0,0228
	2	500	m5y2	39,9275	39,9139	0,0136	0,0341
A1	0,5	100	m1y0.5	39,8879	39,887	0,0009	0,0023
	0,5	500	m5y0.5	52,3466	52,3443	0,0023	0,0044
	2	100	m1y2	39,887	39,8854	0,0016	0,004
	2	500	m5y2	52,3443	52,3411	0,0032	0,0061
A2	0,5	100	m1y0.5	49,1584	49,1578	0,0006	0,0012
	0,5	500	m5y0.5	49,1598	49,1584	0,0014	0,0028
	2	100	m1y2	49,3802	49,3791	0,0011	0,0022
	2	500	m5y2	49,3828	49,3802	0,0026	0,0053

Aşınma testlerine tabi tutulan kaplamalarda altlık malzemesi olarak kullanılan St 52 çeliğinin 0,5 kg yükteki ağırlık kayıplarının 2 kg yükteki ağırlık kayıplarına göre çok daha düşük aşınma kaybı gösterdiği tespit edilmiştir. Ağırlık oranının artması ile aşınma kaybının arttığı gözlenmektedir. 0,5 kg yükte 100 m ve 500 m aşınma mesafelerinde ağırlık kayıpları arasındaki fark 0,0013 gr iken, 2 kg yükte bu fark 0,0045 gr’dır. Mesafenin artışı ile birlikte de aşınma kaybı artmaktadır. En yüksek aşınma miktarı 2 kg yük ve 500 metre mesafede 0,014 gr olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4. Kaplamalarda kullanılan St 52 çelik altığa ait 0,5 kg-100 m, 0,5 kg-500 m ve 2 kg-100 m, 2 kg-500 m aşınma testlerindeki ağırlık kaybı grafiği.

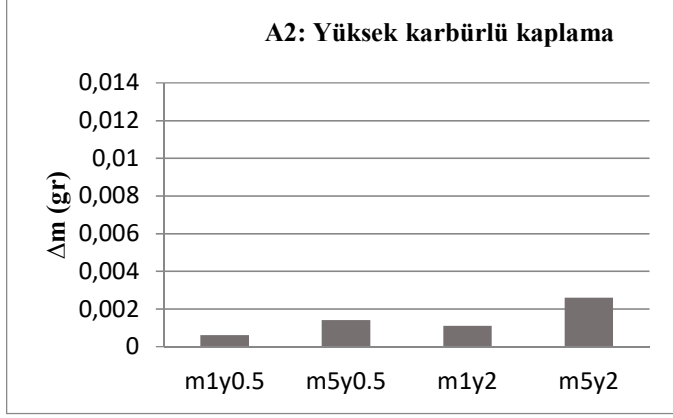
A1 kaplamasında, St 52 çelik altığa göre hem 0,5 kg hem de 2 kg yük altında nispeten daha düşük ağırlık kayıpları elde edilmiştir (Şekil 4). Kaplamanın daha sert olması aşınma direncini arttırmıştır. Buna bağlı olarak aşınma kaybı oranı azalmıştır. 2 kg yük ve 500 m mesafede en yüksek aşınma miktarı tespit edilmiş olup 0,004 gr’ın altındadır. Bu değer altlığın aşınma kaybına oranla 3 kat daha düşüktür. Bu bağlamda Fe-Cr esaslı kaplama altlığın aşınma direncini önemli ölçüde arttırmıştır.



Şekil 5. A1 kaplamasına ait 0,5 kg-100 m, 0,5 kg-500 m ve 2 kg-100 m, 2 kg-500 m aşınma testlerindeki ağırlık kaybı grafiği.

Şekil 5 de A2 kodlu kaplamanın aşınma kaybı ölçüm sonuçları verilmektedir. A1 kaplamasına benzer şekilde Fe, Cr, Mn ve Si gibi elementler içeren fakat A1 kaplamasından farklı olarak Ni, B gibi elementleri ve WC, Ti2C3 gibi sert faz bileşikleri bünyesinde barındıran A2 kaplaması hem 0,5 kg yük hem de 2 kg yük altında A1 kaplamasına nazaran çok daha iyi bir aşınma direnci ortaya koymuştur. 2 kg yük ve 500 m mesafede yapılan test sonuçlarında aşınma kaybı 0,0025 gr seviyesinde ölçülmüştür.

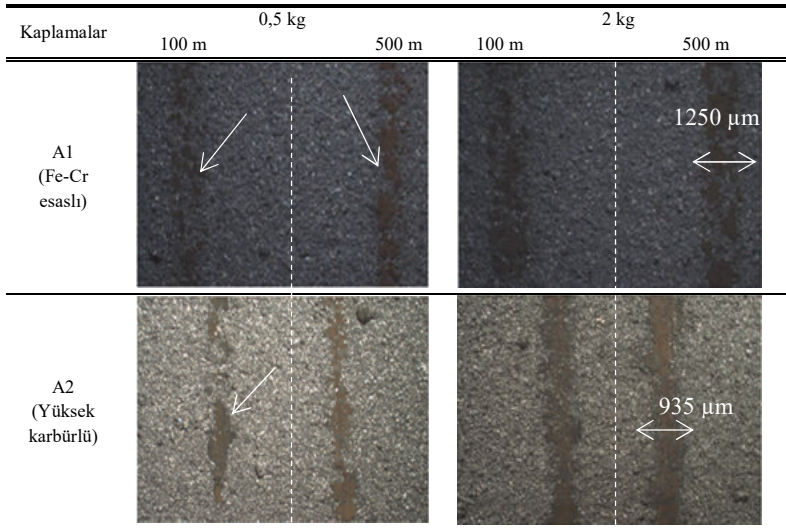
Bu değer A1 kaplaması ile karşılaştırıldığında yaklaşık %40 daha düşük bir aşınma kaybı göstermektedir. Altlık ile karşılaştırıldığında neredeyse 4 kat daha fazla aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6. A2 kaplamasına ait 0,5 kg-100 m, 0,5 kg-500 ve 2 kg-100 m, 2 kg-500 m aşınma testlerindeki ağırlık kaybı grafiği.

3.5. Aşınma İzleri İncelemeleri (Wear Track Investigations)

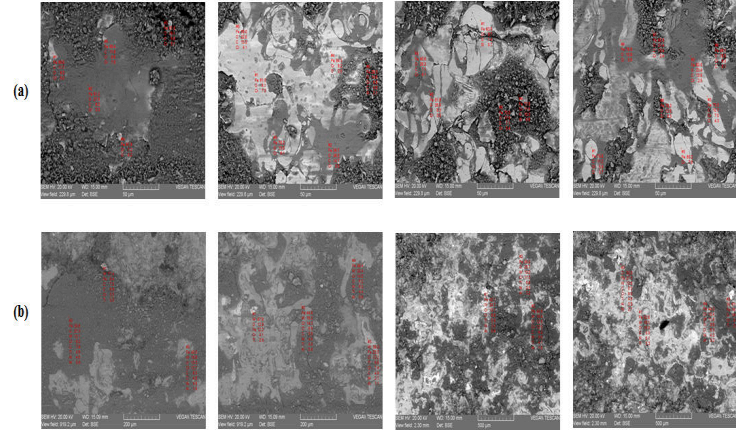
Aşınma testleri yapılan numunelerin genel olarak üst yüzeyden aşınma izleri için farklı büyütmelerde stereo mikroskop görüntüleri alınmıştır. Aşağıdaki şekillerde de görüldüğü gibi yükteki ve mesafedeki artış kaplama yüzeyinden daha fazla partikülün kopmasına sebep olmaktadır. Partiküller koptukça aşınma izlerinde derinleşme ve genişleme görülmektedir. Özellikle 2 kg yük altında ve 500 m mesafede aşınma izleri daha belirgin bir aşınma izi sergilemektedir. Düşük yüklerde aşınma nedeni ayrılmalar sınır seviyede olup aşınma izi kararlı aşınma hızına ulaşmamıştır.



Şekil 7. Aşınma izlerine ait stereo mikroskop görüntüleri.

3.6. Aşınma İzlerinin EDX Analizleri (EDX Analysis)

Aşınma izlerinin, farklı yük ve aşınma mesafelerindeki aşınan yüzeyleri üzerinden EDX analizleri alınmıştır. Aşınmış yüzeylerden alınan EDX analizlerinde oksijen elementinin varlığı tespit edilmiştir. Özlü tellerin kimyasal kompozisyonunda bulunan Al, Fe, Ni gibi oksijene karşı ilgisi yüksek elementlerin ortamdaki oksijenle bağ yaparak oksitlendiği sonucu yapılan EDX analizleri sayesinde kesinlik kazanmıştır. Aşınma izleri içerisinde alınan EDX ölçümlerinde MxOy (M: Fe, D-Cr, Ni, Al) esaslı oksitlerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu durum özlü tel kaplamanın aşınan yüzeyinin belirli noktalarda alt bağ tabaka yüzeyine ulaştığını ve hava ile teması sonucunda yüzeyde karmaşık bir oksit filmi oluşturduğu fikrini güçlendirmektedir. Artan yük ve mesafeye bağlı olarak açığa çıkan tabakanın hızla aşındığı tespit edilmiştir.

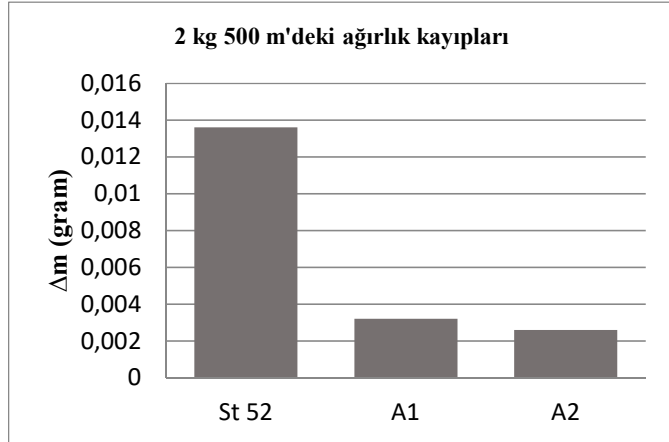


Şekil 8. (a) A1 kaplamasının (b) A2 kaplamasının sırasıyla 0,5 kg 100 m, 0,5 kg 500m ve 2 kg 100m, 2 kg 500 m' deki aşınma izlerinin EDX analizleri.

4. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSION)

Ark Sprey tekniği ile üretilen özlü tel kaplamalar için altlık malzemesi olarak kullanılan St 52 çelik referans alınarak kaplamaların aşınma davranışları karşılıklı olarak incelenmiştir. Özlü teller ile kaplanan numuneler St 52 çelik ile kıyaslandığında daha yüksek sertliğe sahip oldukları ve aşınma testlerinde daha düşük aşınma kaybı gösterdikleri tespit edilmiştir. Üretilen kaplamalar birbiri ile kıyaslandığında ise yüksek kabürlü özlü tel ile kaplanan A2 numunesi Fe-Cr esaslı özlü tel ile kaplanan A1 numunesine göre daha yüksek sertlik ve aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür.

Aşınma yükü ve mesafenin artışının kaplamanın aşınma kaybını artırdığı tespit edilmiştir. Yüksek karbür içerikli özlü teller en yüksek aşınma direncine sahip olmakla birlikte altlığa göre de 4 kat daha fazla aşınma dayanımı sağladıkları belirlenmiştir. Bu bağlamda özlü teller ile yüksek gerilme altında çalışan mekanik parçaların aşınma performansı artırılabilir. Birçok uygulama için alternatif bir yüzey kaplama kompozisyonu olarak kullanılması söz konusudur. Aşağıda kaplamaların karşılaştırmalı olarak en yüksek yük ve en uzun mesafede aşınma kayıpları sergilenmektedir.





Şekil 9. Altlık ve kaplamalara ait ağırlık kayıpları.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Steffens H. D., Babiak Z. And Wewel M. IEE Recent developments in arc spraying Transactions On Plasma Science Vol. 18 No. 6 December 1990.
- [2] Kruger J., Knepper M., Arc spray coating for industrial application, International Thermal Spray Conference, Essen, Germany, 4-6 March 2002.
- [3] Nellesen J., Abdulgader M., Tillmann W., and Beckmann F. 3D ICT and SEM Analysis of Resolidified Tips of Cored Wires Used in Twin-Wire Arc Spraying.
- [4] Hussary N., "Investigations into the wire arc spraying process", thesis of Doctora, Univesrsity of Minnesota, May 2003.
- [5] <http://coating-ball.com/index.php?page=electric-arc-spray>, Erişim Tarihi: 22.09.2017.

- [6] Can-Ming Wang, Hong-Fei Sun and Qiang Song Properties of Fe-based Cr3C2 Coatings Produced with a High Velocity Arc-Spraying Process Journal of the Korean Physical Society, Vol. 54, No. 3, March 2009.
- [7] Dallaire S. and Levert H. Development of Cored Wires for Improving the Abrasion Wear Resistance of Austenitic Stainless Steel, 7 February 1997.
- [8] Widen J., Wank A., Schreiber F. Wires for arc-and high velocity flame spraying-wire design, materials and coating properties ITSC 2000, Montreal,Canada, 8-11 May 2000.
- [9] Tillmann W. and Abdulgader M. Particle Size Distribution of the Filling Powder in Cored Wires: Its Effect on Arc Behavior, In-Flight Particle Behavior, and Splat Formation, September 1, 2011.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 21-03-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 26-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.299127	

Zeytin Karasuyunun Elektrokoagülasyon ön arıtımlı tek fazlı Anaerobik arıtımı

Canan Can Yarımtepe^{1,2}, Nilgün Ayman Öz^{2*}, Orhan İnce¹

ÖZ

Bu çalışma kapsamında Çanakkale ili ve çevresi için önemli bir çevre sorunu teşkil eden zeytin karasuyunun tek fazlı ardışık kesikli anaerobik reaktörler ile arıtılabilirliği elektrokoagülasyon ön arıtımı kullanılarak incelenmiştir. Elektrokoagülasyon ön işlemi sayesinde, karasudaki kirletici konsantrasyonları, askıda katı madde miktarı başta olmak üzere çeşitli kirletici parametreleri bazında önemli bir giderim sağlanmıştır. Ön arıtılmış karasu numuneleri tek fazlı anaerobik reaktöre beslenerek, anaerobik arıtım verimliliği; çKOİ giderimi, biyogaz oluşumu ve metan içeriği açısından incelenmiştir. Hidrolik bekletme süresi 1 gün; çamur bekletme süresi 20 gün; organik yükleme oranı 1 gr KOİ/gr UAKM-gün olarak 30 gün boyunca işletilen ardışık kesikli anaerobik reaktörde; ortalama %70 organik madde giderimi elde edilmiştir. Eş zamanlı olarak günlük ortalama %80 metan içerikli 1000 mL biyogaz oluşumu sağlanmıştır. İşletme süresince metan üretim hızı ortalama 0,27 mL CH₄/gr KOİgiderilen ve kümülatif metan gazı oluşumu 19981 mL olarak tespit edilmiştir. Ön arıtımlı tek fazlı anaerobik arıtım ile; karasuyun organik madde içeriğinde büyük oranda giderim elde edilmiş, eş zamanlı olarak da temiz bir enerji kaynağı olan metan içeriği yüksek biyogaz eldesi sağlanmıştır. Bu çalışmanın bulguları; elektrokoagülasyon gibi kısa süreli bir ön arıtım ile; karasuyun tek fazlı anaerobik reaktöre doğrudan beslenebildiğini aynı zamanda bu sistemlerden yüksek verimi alınabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Zeytin karasuyu, ön arıtım, elektrokoagülasyon, anaerobik arıtım, koi giderimi, biyogaz oluşumu.

Single phase Anaerobic treatment of Olive Mill Wastewater pretreated by Electrocoagulation

ABSTRACT

In this study, anaerobic treatability of olive mill wastewater (OMW) which is an important environmental problem for Canakkale province, was investigated by using electrocoagulation pretreatment. With electrocoagulation pretreatment; significant pollutant removal efficiencies, mainly in terms of suspended solids, has been provided. Pretreated OMW samples were fed to single phase anaerobic reactor and anaerobic treatability has been investigated in terms of sCOD removal, biogas production and methane yield. In sequencing batch anaerobic reactor which was operated with 1 day as HRT, 20 days as SRT and

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Turkey

² Canakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 17100, Çanakkale, Turkey

1 gr COD/gr VSS-day as OLR; organic matter removal efficiency was determined as about 70% for 30 days. Daily biogas production and methane yield were determined as 1000 mL and 80%, respectively. During the operation; while 19981 mL methane was produced, methane production rate was determined as 0.27 mL CH₄/gr CODremoved. With electrocoagulation assisted single phase anaerobic treatment; while organic matter concentration of OMW has been significantly removed, biogas with high methane content has been produced simultaneously. According to results of this study, it has been stated that, with a pretreatment in short duration like electrocoagulation, pretreated olive mill wastewater could be fed directly to anaerobic reactor and high efficiencies could be obtained in anaerobic reactors.

Keywords: Olive mill wastewater, pretreatment, electrocoagulation, anaerobic treatment, cod removal, biogas production.

*Sorumlu yazar. Adres: Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Çanakkale 17100, Turkey. Tel.: +90 286 218 0018 / 2177; Fax: +90 286 218 0541. E-mail: nilgunayman@comu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Zeytinyağı endüstrisi ülkemizin de içinde bulunduğu Akdeniz bölgesinde önemli bir zirai faaliyet alanıdır. Ülkemizde zeytin üreticiliği özellikle Marmara ve Kuzey Ege bölgelerinde yoğunlaşmaktadır. Zeytin ve zeytinyağı üretimi sırasında karasu olarak tanımlanan yüksek miktarda atıksu oluşmaktadır. Bu atıksuyun arıtımı, içeriğindeki yüksek kirletici konsantrasyonları ve kompleks yapısı nedeni ile oldukça zor ve maliyetlidir. Zeytin karasuyunun arıtımına yönelik; fiziksel [1], kimyasal [2][3] ve biyolojik [4] arıtım prosesleri denenmiştir. Literatürde, aerobik sistemlere göre düşük çamur oluşumu, az enerji ihtiyacı ve biyogaz potansiyeli gibi birçok avantajı bulunan anaerobik arıtım prosesinin zeytin karasuyunun arıtılmasında kullanmasına yönelik çalışmalar mevcuttur [5][6][7]. Ancak zeytin karasuyunun içeriğindeki toksik/kompleks maddeler, lipidler ve yüksek katı madde miktarı anaerobik arıtım verimini kısıtlamaktadır. Bu nedenle, biyolojik arıtımın verimliliğini artırmak için çeşitli ön arıtım proseslerinin uygulanması gerekmektedir. Son yıllarda bu konularda yapılan laboratuvar ölçekli çalışmaların sayısında önemli bir artış gözlemlenmektedir.

Zeytin karasuyunun anaerobik arıtımı öncesi; aerobik arıtım [8][9], fiziko- kimyasal arıtım [10], adsorbsiyon [11], filtrasyon [12], ozonlama [13] ve ultrases [14][15] gibi birçok farklı ön arıtım prosesleri denenmiştir [16]. Atıksudan kirleticilerin uzaklaştırılmasında; adsorbsiyon, çöktürme ve flotasyon gibi birden fazla mekanizmanın rol aldığı bir proses olan elektrokoagülasyon atıksu arıtımında sıklıkla uygulanan bir prosestir [17]. Prosesin özellikle, biyolojik arıtım öncesinde, biyolojik proseslerin

Parametre	Birim	Karasu	Aşı çamuru
pH		5,05	-
İletkenlik	µs/cm ²	14460	-
Bulanıklık	NTU	19200±55	-
TKM	mg/L	56325±310	76728
TUKM	mg/L	39846±203	62908
AKM	mg/L	21350±107	50281
UAKM	mg/L	19600±50	35704
KOİ	mg/L	110393±271	-
BOİ	mg/L	28210±105	-
çKOİ	mg/L	57460±190	-

veriminin artırılmasında uygulanabileceği belirtilmiştir [17]. Böyle bir ön arıtım ile; karasuyun yoğun kirlilik konsantrasyonlarının bir miktar azaltılabileceği ve reaktörlerin işletiminin kolaylaştırılabileceği, bu sayede anaerobik arıtımından daha iyi bir verim elde edilmesinin mümkün olabileceği düşünülmektedir. Literatürde farklı atıksular için elektrokoagülasyon ön arıtımlı

anaerobik arıtım performansının incelendiği birkaç çalışma [3][18][19] rapor edilmiştir. Bu çalışmalarda; elektrokoagulasyonun, katı madde gideriminde etkili olduğu; aynı zamanda biyolojik ayrışabilirliği düşük organik maddelerin (özellikle polifenollerin) önemli bir bölümünün uzaklaştırıldığı belirtilmiştir. Literatürde karasuyun elektrokoagulasyon ön arıtmılı tek fazlı anaerobik arıtımının incelendiği bir çalışmaya ise henüz rastlanmamıştır.

Bu kapsamda bu çalışmanın amacı elektrokoagulasyon ön arıtımı ile zeytin karasuyunun anaerobik olarak arıtımının, gerek performans gerekse metan içeriği açısından incelenmesidir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. Atıksu ve aşı çamuru karakterizasyonu (Characterization of wastewater and seed sludge)

Çalışma süresince kullanılan zeytin karasuyu numuneleri Çanakkale ili Ayvacık ilçesinde bulunan 100 ton/gün zeytin işleme kapasitesine sahip, üç fazlı sistemle çalışan, TARİŞ Geyikli Zeytin İşleme Fabrikası çıkış atıksu akımından Aralık 2015'te kompozit olarak alınmış ve karakterizasyonu yapılmıştır. Tek fazlı anaerobik reaktörlerde kullanılan aşı çamuru İzmir'de bulunan Türk Tuborg Bira ve Malt Sanayi A.Ş. Anaerobik akışkan yataklı reaktöründen alınmıştır. Kullanılan aşı çamurlarının özellikleri, toplam katı madde (TKM), toplam uçucu katı madde (TUKM), askıda katı madde (AKM) ve uçucu askıda katı madde (UAKM) parametreleri ile belirlenmiştir. Atıksu ve aşı çamuru kompozisyonu Tablo 1.'de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere; karasuyun yoğun organik madde ve katı madde konsantrasyonları mevcuttur.

Tablo 1. Atıksu karakterizasyonu (Wastewater characterization)

*n=10

2.3. Analitik metotlar (Analytical methods)

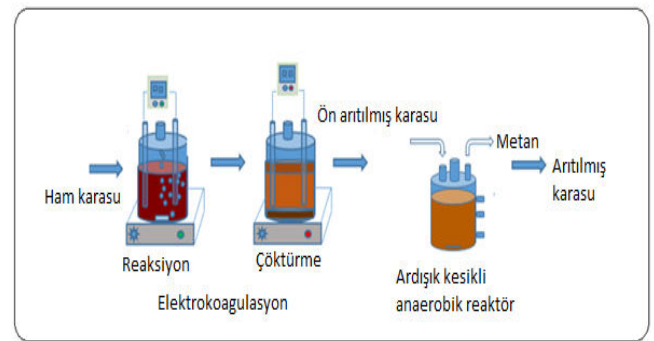
Çalışma süresince tüm analizler standart metotlara uygun olarak yürütülmüştür [20]. İletkenlik ve pH, ORION SA 520 çoklu ölçüm cihazı ile; bulanıklık Hach-2100AN IS Türbidimetre cihazı ile ölçülmüştür. Kimyasal oksijen ihtiyacı ve

çözünmüş oksijen ihtiyacı (0,45 membran filtreden süzülükten sonra) kapalı reflaks metodu ile standart metotlara uygun olarak belirlenmiştir. Katı madde analizleri (Toplam katı madde, askıda katı madde, toplam uçucu katı madde ve uçucu askıda katı madde) ve biyokimyasal oksijen ihtiyacı analizi standartlara uygun olarak yürütülmüştür. Anaerobik reaktörlerde oluşan gaz, milli gaz cihazı (Ritter) ile belirlenmiş; oluşan gazın kompozisyonu ise Agilent 7820A model termal kondaktivite detektörlü bir gaz kromatografisi (Supelco) cihazı kullanılarak belirlenmiştir.

Parametreler	Birim	Karasu
pH		7,2
İletkenlik	$\mu\text{s}/\text{cm}^2$	16280
Bulanıklık	NTU	2680±45
TKM	mg/L	37420±100
TUKM	mg/L	23420±85
AKM	mg/L	3700±55
UAKM	mg/L	3310±32
KOİ	mg/L	50499±148
BOİ	mg/L	19505±97
çKOİ	mg/L	40232±112

2.4. Deneysel Düzenek (Experimental set-up)

Çalışma kapsamında karasu numuneleri ilk olarak ön arıtım amacı ile elektrokoagulasyon prosesine tabi tutulmuş, sonrasında elektrokoagulasyon çıkış atıksuyu anaerobik reaktöre beslenmiştir. Deneysel düzenek Şekil 1.'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Deneysel düzenek (Experimental set-up)

Anaerobik ardışık kesikli reaktör çalışması; ısıtmalı ve karıştırılmalı su banyosu içeri-sinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma süresince; sıcaklık

35±2°C ve karıştırma hızı 90 devir/dak olacak şekilde sabitlenmiştir. Aktif hacmi 1 L olan reaktör, karasu ile besle-nerek, S/X oranı (substrat/biyokütle) kademeli olarak arttırılmıştır. Reaktöre; her bir devir; 15 dk doldurma, 23 saat reaksiyon, 30 dk çökelme, 15 dk boşaltma fazlarından oluşacak şekilde günde bir kez besleme yapılmıştır. Atıksuyun pH'ı 6,8-7 arasında ayarlanarak, 1000-1500 mg/L sodyum bikarbonat formunda alkalinite eklenmiştir. Reaktör; hidrolik bekletme süresi 1 gün, çamur bekletme süresi 20 gün olacak şekilde işletilmiştir. Deneysel süresince çKOİ giderimi, biyogaz oluşumu ve içeriği takip edilmiştir. Reaktörün işletim verimi çKOİ giderimi ve biyogaz oluşumu baz alınarak takip edilmiştir.

Elektrokoagulasyon prosesi; iki adet alüminyum elektrot içeren 1 litre hacimli cam reaktörde yürütülmüştür. Elektrokoagulasyon; 10 volt doğru akım altında 4 saat süre ile uygulanmıştır. Elektrokoagulasyon prosesi sonrasında elde edilen üst faz numune-lerinin kompozisyonu standart metotlara uygun olarak izlenmiş, sonuçlar Tablo 2.'de özetlenmiştir. Ön arıtım deneyleri önceki bir çalışmada detaylı olarak açıklanmıştır [21].

Tablo 2. Ön arıtılmış karasu kompozisyonu (Composition of pretreated OMW) [21]

2.5. Spesifik Metan Aktivite Testi (Specific methanogenic activity test)

Anaerobik reaktörde kullanılacak çamurun metan aktivitesini belirleyebilmek için SMA testleri yapılmıştır. 1 L hacimli her bir reaktörde UAKM konsantrasyonu yaklaşık olarak 5000 mg/L olacak şekilde seyreltme suyu ile gerekli seyreltmeler yapılmıştır. Reaktörler; pH'ları 6.8-7 arasında olacak şekilde ayarlandıktan sonra 35°C'de karıştırmalı su banyosuna yerleştirilmiştir. Mikroorganizmaların yeni ortamlarına alışması için 12-16 saat beklenmiştir. Bekleme süresi sonunda, reaktörler substrat olarak asetat ile farklı konsantrasyonlarda (1000, 2000, 4000 ve 5000 mg/L) beslenmiştir. Her bir reaktörde oluşan biyogaz miktarı kaydedilmiş, düzenli aralıklarla metan içeriği analiz edilmiştir. Daha sonra bu veriler kullanılarak SMA değerleri hesaplanmıştır.

Potansiyel metan üretimi aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır [22];

$$SMA \text{ (mL CH}_4\text{/gUAKM.gün)} = (A \times B \times 24) / (D \times E) \quad (1)$$

A: 1 saatteki biyogaz üretimi

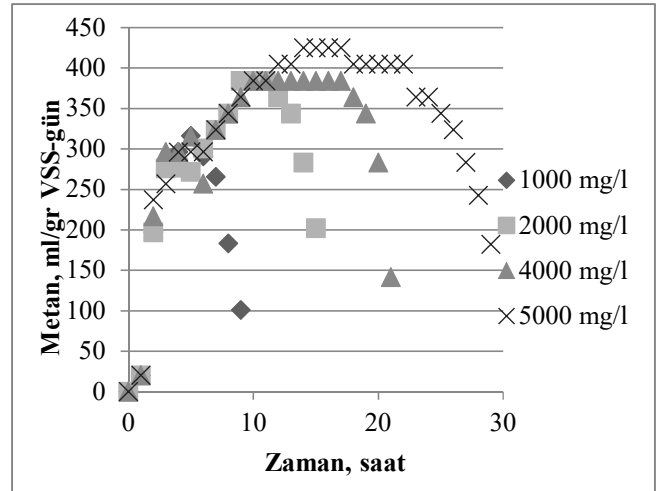
B: Biyogazın metan içeriği

D: SMA test reaktörünün aktif hacmi

E: SMA test reaktöründeki biyokütle konsantrasyonu (gUAKM/L)

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Anaerobik sistemlerden yüksek performans elde edilebilmesi, reaktörde bulunan mikrobiyal topluluğun aktivitesine ve kompozisyonuna bağlıdır. Bu nedenle proje süresince reaktör çalışmalarında kullanılacak aşı çamurunun aktivitesi spesifik metanojenik aktivite testi ile belirlenmiştir. Metanojenik aktivite testinde substrat olarak 1000, 2000, 4000 ve 5000 mg/L konsantrasyonlarında asetat kullanılmıştır. SMA test sonuçlarının zamana bağlı metan üretim hız değerleri Şekil 2.'de verilmektedir.



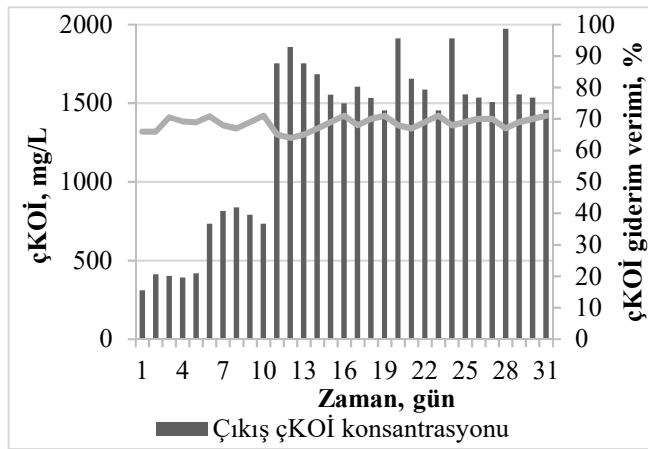
Şekil 2. Çeşitli asetat konsantrasyonlarında metan gazı üretim hızı (Methane production rate at different acetate concentrations)

Aktivite testi sonucunda; 1000, 2000, 4000 ve 5000 mg/L asetat ile beslenen reaktör-lerde maksimum metan oluşum hızı sırasıyla; 316 mL CH₄/gUAKM.gün, 384 mL CH₄/gUAKM.gün, 384 mL CH₄/gUAKM.gün ve 424 mL CH₄/gUAKM.gün olarak bulunmuştur. Literatürde, 300 mL CH₄/gUAKM.gün'den daha yüksek potansiyel metan üretim (PMÜ) hızlarına sahip anaerobik çamurlar iyi kalite çamur olarak belirtilmişlerdir [23]. Aktivite test sonuçlarına göre çalışma süresince metanojenik kapasitesi yüksek olan bu çamurun kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir.

Ardışık kesikli anaerobik reaktöre, içerisindeki biyokütle konsantrasyonu 5000 mg/L olacak

şekilde, aşı çamuru yüklemesi yapılmıştır. Aşı çamuru eklenen reaktör, anaerobik şartlar altında bir gün süre ile karıştırılmadan 35°C'de su banyosunda bekletilmiş, anaerobik mikroorganizmaların adaptasyonu sağlanmıştır. Aktif hacmi 1 L olan anaerobik ardışık kesikli reaktörde S/X oranı (substrat/biyokütle) kademeli olarak arttırılarak (0,2-0,5 ve 1 aralığında) 24 saatlik hidrolitik bekletme süresinde 1 ay boyunca işletilmiştir. Reaktörde doldurma, reaksiyon, durdurma ve boşaltma süreleri sırasıyla 15 dakika, 23 saat, 30 dakika ve 15 dakikadır. Bu şartlar altında reaktörlerde hidrolitik bekletme süresi yaklaşık 1,05 ile 1,15 gün arasında tutulmuştur.

Çalışma süresince, çıkış çKOİ konsantrasyonu ve giderim verimi, biyogaz oluşumu ve metan içeriği takip edilmiştir. Çalışmanın ilk 5 günü reaktör 0,2 S/X oranı ile işle-tilmiş, 10. gün sonunda S/X oranı 1'e çıkartılmıştır. 10. günden itibaren, reaktörlerde-ki çKOİ giderimi ve biyogaz oluşumu sabitlenmiştir. 30 günlük işletim boyunca reaktör çıkışındaki çKOİ konsantrasyonları ve çKOİ giderim verimleri Şekil 3.'te gösterilmektedir.

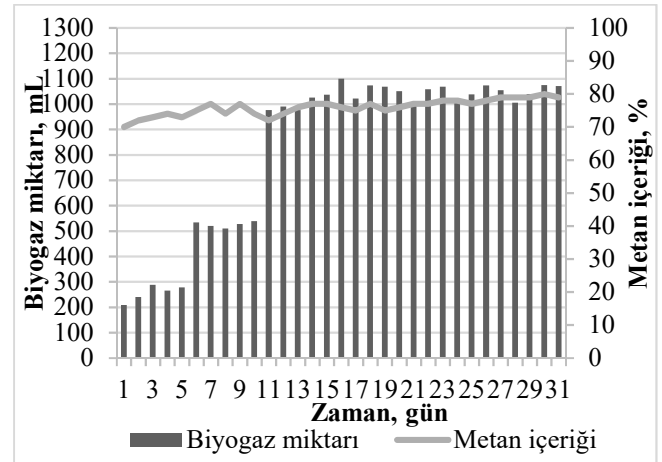


Şekil 3. Reaktör çıkışındaki çKOİ konsantrasyonları ve çKOİ giderim verimleri (Effluent sCOD and sCOD removal efficiencies)

Şekilden görüldüğü üzere; çalışmanın başlangıç evresinde %65 çKOİ giderimi elde edilirken, mikroorganizmaların ortama alışmasına bağlı olarak bu değer %70'lere kadar yükseltilmiştir. Çalışmanın 10. gününden itibaren sistem, yüklenen en yüksek S/X oranı olan 1'de çalıştırılmaya başlanmış ve çKOİ giderimi %64 seviyelerine gerilemiştir. Bu durumun mikroorganizmaların aşırı substrat nedeni ile aktivitelerini kaybettikleri ile açıklanabilmektedir. Ancak bu durum birkaç gün sürmüş, sonrasında mikroorganizmaların yeni organik yüklemeye alışması ile çKOİ giderim verimi yeni-den %70'lere çıkarılmıştır. Çalışmanın 15. gününden itibaren çKOİ giderimi %70±2 seviyesinde

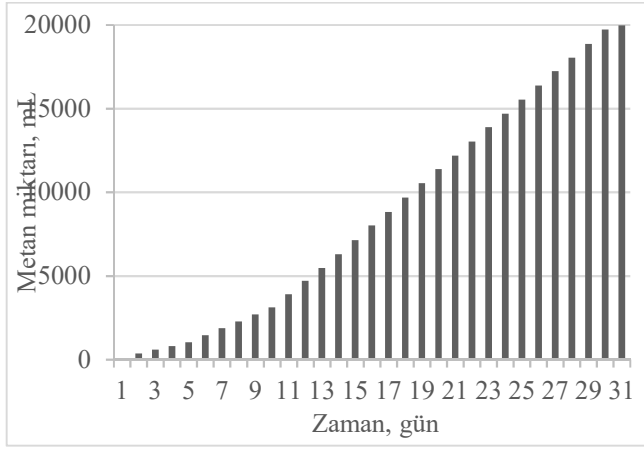
sabitlenmiştir. Bu şartlar altında, reaktör verimi %70 civarında gerçekleş-tiğinden daha yüksek organik yüklemelere çıkılamayacağı anlaşılmış ve çalışmanın bundan sonraki bölümünde reaktör S/X oranı 1 olacak şekilde işletilmiştir. Ön arıtım prosesi sonrasında büyük oranda giderilen katı madde konsantrasyonuna bağlı olarak, anaerobik reaktörün daha stabil işletilebildiği ve organik madde gideriminin sağlandığı düşünülmektedir. Khoufi et al. (2008); elektrokoagulasyon ile ön arıtım uyguladıkları zeytin karasuyunun anaerobik filtrede arıtılabilirliğini inceledikleri çalışmalarında; 38,5 gr KOİ/L organik yüklemelerde %89 KOİ giderimi rapor etmişlerdir. İlaç endüstri atıksuyunun elektrokoagulasyon ön arıtmılı anaerobik arıtımının incelendiği bir çalışmada ise; 2 günlük hidrolitik bekletme süresi ve 0,6 ila 4 kg KOİ/L aralığında değişen organik yüklemelerde %80 ila 90 arası KOİ giderimi sağlandığı belirtilmiştir [24].

Anaerobik arıtımın en önemli parametrelerinden biri olan biyogaz oluşumu reaktör işletme süresince takip edilmiştir. Reaktörde oluşan günlük biyogaz üretimi ve metan içeriği Şekil 4.'te; kümülatif metan üretimi ise Şekil 5.'te gösterilmektedir.



Şekil 4. Reaktörde oluşan günlük biyogaz miktarı ve metan içeriği (Daily methane production and yield during the process)

Proses başlangıcında; günlük 200 mL oluşan biyogaz miktarı reaktöre beslenen orga-nik yükün artışına paralel olarak kademeli olarak artmış ve 15. günden sonra 1000 mL ile en yüksek seviyesine ulaşmıştır. 30 günlük işletim sonucunda oluşan toplam biyogaz miktarı 26294 mL olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. Rektörde oluşan kümülatif metan gazı miktarı (Cumulative methane production during the process)

Anaerobik sistemlerin verimliliğinde elde edilen biyogazın metan içeriği önemli bir parametredir. Bu çalışma süresince de oluşan biyogazın kompozisyonu takip edilmiş ve metan içeriği 80 ± 3 olarak bulunmuştur. 30 günlük işletim süresinde, metan üre-tim hızı ortalama $0,27 \text{ mL CH}_4/\text{gr KOİgiderilen}$; üretilen kümülatif metan gazı miktarı ise 19981 mL olarak hesaplanmıştır. Literatürde elektrokoagulasyon ön arıtmılı anaerobik arıtılabilirliğin incelendiği az sayıda çalışmada; metan üretim hızı $0,2$ ile $0,3 \text{ mL CH}_4/\text{gr KOİgiderilen}$ olarak rapor edilmiştir [25][26] Atık aktif çamurun elektrokoagulasyonla ön arıtımı sonrası anaerobik arıtımının gerçekleştirildiği bir diğer çalışmada; ön arıtımsız çamur ile karşılaştırıldığında ön arıtmılı atık çamur ile beslenen reaktörde 21 daha yüksek metan üretim hızı elde edildiği raporlanmıştır [26]. Ön arıtım prosesi ile kompleks organik maddelerin ayrışabilirliğinin artırıldığı ve bu sayede daha yüksek metan içerikli daha fazla biyogaz üretimi elde edildiği düşünülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma kapsamında, karasuyun elektrokoagülasyon ön arıtmılı tek fazlı anaerobik arıtımı incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında, özellikle atıksuyun katı madde miktarının azaltılmasına yönelik uygulanan bir ön arıtım prosesinin anaerobik arıtım prosesi ile entegrasyonu ile daha iyi reaktör performansı ve buna bağlı olarak daha yüksek organik madde giderimi ve biyogaz oluşumu elde edilebileceği belirlenmiştir. Özellikle karasu gibi yoğun organik madde ve katı madde içeren kompleks bir atıksuyun 4 saat gibi kısa süreli bir ön arıtım prosesi ile anaerobik sisteme verilecek organik

yükün azaltılabildiği ve bu sayede anaerobik sistemin verimliliğinin iyileştirildiği gösterilmiştir. Bu kombine metotun karasu gibi yüksek organik madde içeriğine sahip ve/veya hidroliz aşamasının hız sınırlayıcı olduğu diğer atık ve atıksular için de uygulanabileceği düşünülmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafın-dan desteklenmiştir (Proje No: ARDEB 114Y179).

Kaynakça (References)

- [1] E. Turano, S. Curcio, M. G. De Paola, V. Calabrò, ve G. Iorio, "An integrated centrifugation-ultrafiltration system in the treatment of olive mill wastewater", *J. Memb. Sci.*, c. 209, sayı 2, ss. 519–531, 2002.
- [2] A. Ginos, T. Manios, ve D. Mantzavinos, "Treatment of olive mill effluents by coagulation-flocculation-hydrogen peroxide oxidation and effect on phytotoxicity", *J. Hazard. Mater.*, c. 133, sayı 1–3, ss. 135–142, 2006.
- [3] S. Khoufi, F. Aloui, ve S. Sayadi, "Treatment of olive oil mill wastewater by combined process electro-Fenton reaction and anaerobic digestion", *Water Res.*, c. 40, sayı 10, ss. 2007–2016, 2006.
- [4] G. Aggelis, D. Iconomou, M. Christou, D. Bokas, S. Kotzailias, G. Christou, V. Tsagou, ve S. Papanikolaou, "Phenolic removal in a model olive oil mill wastewater using *Pleurotus ostreatus* in bioreactor cultures and biological evaluation of the process", *Water Res.*, c. 37, sayı 16, ss. 3897–3904, 2003.
- [5] D. Dalis, K. Anagnostidis, A. Lopez, I. Letsiou, ve L. Hartmann, "Anaerobic digestion of total raw olive-oil wastewater in a two-stage pilot-plant (up-flow and fixed-bed bioreactors)", *Bioresour. Technol.*, c. 57, sayı 3, ss. 237–243, 1996.
- [6] T. H. Ergüder, E. Güven, ve G. N. Demirer, "Anaerobic treatment of olive mill wastes in batch reactors", *Process Biochem.*, c. 36,

- sayı 3, ss. 243–248, 2000.
- [7] B. Y. Ammary, “Treatment of olive mill wastewater using an anaerobic sequencing batch reactor”, *Desalination*, c. 177, sayı 1–3, ss. 157–165, 2005.
- [8] G. Pinto, A. Pollio, L. Previtiera, M. Stanzione, ve F. Temussi, “Removal of low molecular weight phenols from olive oil mill wastewater using microalgae”, *Biotechnol. Lett.*, c. 25, sayı 19, ss. 1657–1659, 2003.
- [9] C. F. Cereti, F. Rossini, F. Federici, D. Quarantino, N. Vassilev, ve M. Fenice, “Reuse of microbially treated olive mill wastewater as fertiliser for wheat (*Triticum durum* Desf.)”, *Bioresour. Technol.*, c. 91, sayı 2, ss. 135–140, 2004.
- [10] K. Kestioğlu, T. Yonar, ve N. Azbar, “Feasibility of physico-chemical treatment and Advanced Oxidation Processes (AOPs) as a means of pretreatment of olive mill effluent (OME)”, *Process Biochem.*, c. 40, sayı 7, ss. 2409–2416, 2005.
- [11] M. Beccari, L. Bertin, D. Dionisi, F. Fava, S. Lampis, M. Majone, F. Valentino, G. Vallini, ve M. Villano, “Exploiting olive oil mill effluents as a renewable resource for production of biodegradable polymers through a combined anaerobic-aerobic process”, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, c. 84, sayı 6, ss. 901–908, 2009.
- [12] I. Sabbah, T. Marsook, ve S. Basheer, “The effect of pretreatment on anaerobic activity of olive mill wastewater using batch and continuous systems”, *Process Biochem*, c. 39, ss. 1947–1951, 2004.
- [13] R. Andreozzi, G. Longo, M. Majone, ve G. Modesti, “Integrated treatment of olive oil mill effluents (OME): Study of ozonation coupled with anaerobic digestion”, *Water Res.*, c. 32, sayı 8, ss. 2357–2364, 1998.
- [14] N. A. Oz ve C. C. Yarimtepe, “Ultrasound assisted biogas production from landfill leachate.”, *Waste Manag.*, c. 34, sayı 7, ss. 1165–70, 2014.
- [15] N. A. Oz ve A. C. Uzun, “Ultrasound pretreatment for enhanced biogas production from olive mill wastewater”, *Ultrason. Sonochem.*, c. 22, ss. 565–572, 2015.
- [16] S. Erdem, C. C. Yarimtepe ve N. A. Oz, “Zeytin Karasuyunun Arıtım Yöntemleri”, *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c.1, sayı 1, 2015.
- [17] M. Bayramoglu, M. Kobya, M. Eyvaz, ve E. Senturk, “Technical and economic analysis of electrocoagulation for the treatment of poultry slaughterhouse wastewater”, *Sep. Purif. Technol.*, c. 51, sayı 3, ss. 404–408, 2006.
- [18] S. Khoufi, F. Feki, ve S. Sayadi, “Detoxification of olive mill wastewater by electrocoagulation and sedimentation processes”, *J. Hazard. Mater.*, c. 142, sayı 1–2, ss. 58–67, 2007.
- [19] K. Yetilmezsoy, F. Ilhan, Z. Sapci-Zengin, S. Sakar, ve M. T. Gonullu, “Decolorization and COD reduction of UASB pretreated poultry manure wastewater by electrocoagulation process: A post-treatment study”, *J. Hazard. Mater.*, c. 162, sayı 1, ss. 120–132, 2009.
- [20] A. Public ve H. Association, “APHA: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, *Am. Public Heal. Assoc. Water Work. Assoc. Environ. Fed.*, c. 552, 1998.
- [21] C. C. Yarimtepe, N. A. Oz ve O. Ince, “Volatile fatty acid production dynamics during the acidification of pretreated olive mill wastewater”, *Bioresour. Technol.*, c. 241, sayı October 2017, ss. 936–944, 2017.
- [22] O. Ince, M. Kolukirik, N. A. Oz, ve B. K. Ince, “Comparative evaluation of full-scale UASB reactors treating alcohol distillery wastewaters in terms of performance and methanogenic”, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, c. 80, sayı October 2003, ss. 138–144, 2005.
- [23] O. Ince, “Potential energy production from anaerobic digestion of dairy wastewater”, *J. Environ. Sci. Heal. Part A - Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng.*, c. 33, sayı 6, ss. 1219–1228, 1998.
- [24] A. M. Deshpande, S. Satyanarayan, ve S.

- Ramakant, “Treatment of high-strength pharmaceutical wastewater by electrocoagulation combined with anaerobic process”, *Water Sci. Technol.*, c. 61, sayı 2, ss. 463–472, 2010.
- [25] S. Khoufi, F. Aloui, ve S. Sayadi, “Extraction of antioxidants from olive mill wastewater and electro-coagulation of exhausted fraction to reduce its toxicity on anaerobic digestion”, *J. Hazard. Mater.*, c. 151, sayı 2–3, ss. 531–539, 2008.
- [26] G. Zhen, X. Lu, Y. Y. Li, ve Y. Zhao, “Combined electrical-alkali pretreatment to increase the anaerobic hydrolysis rate of waste activated sludge during anaerobic digestion”, *Appl. Energy*, c. 128, ss. 93–102, 2014.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 19-06-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 29-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.322448	

İklimlendirme uygulamalarında Chiller-Kuru Soğutucu enerji analizi

A.Talat İnan*¹

ÖZ

Sürdürülebilir enerji için yeni teknoloji ve ürünlerin etkin ve verimli kullanılması oldukça önemlidir. Hem konut hem de endüstride geniş bir uygulama alanına sahip chiller-kuru soğutucu ikilisi de bu kapsamdadır. Dış hava sıcaklıklarına bağlı olarak kuru soğutucular hem tek başlarına hem de chiller ile entegre edilerek işletilebilirler. Bu çalışmada, Türkiye’de farklı iklim bölgelerini temsil eden sekiz ile ait bin değerleri esas alınarak chiller-kuru soğutucu ikilisine ilişkin enerji analizleri yapılmıştır. Yıllık bin değerlerine göre üç farklı çalışma senaryosu uygulanarak 365 gün 7/24 iklimlendirme ihtiyacı olması durumunda, enerji kazancı ve yatırımın geri dönüş süreleri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: chiller-kuru soğutucu, bin değeri, enerji analizi

Energy analysis of Chiller-Dry Cooler in air conditioning applications

ABSTRACT

Effective and productive use of new technology and products for sustainable energy is very important. Chiller-dry cooler couple, which have a wide application in both residential and industrial areas, is considered in this respect. Depending on the outside temperatures, the dry coolers can be operated stand alone or coupled with the chiller. In this study, energy analyzes of the chiller-dry cooler couple were carried out based on the bin values belonging to eight provinces representing different climatic regions in Turkey. Three different scenarios were applied according to the annual value of the bin on basis of 365 days and 24/7 in which air conditioning is required. Consequently, energy savings and investment pay back time were determined.

Keywords: chiller-dry cooler, bin values, energy analysis

* A.Talat İnan

¹ Marmara Üniversitesi, ainan@marmara.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerjinin etkin ve verimli kullanılmasında sürdürülebilir olmasının önemi her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle enerji tesis ve tesisatlarında kullanılan chillerlerde tüketilen enerjiye bağlı olarak sistem tasarımlarında ve işletilmesinde soğutma için harcanacak enerji maliyetini azaltmaya yönelik uygulamalar yapmak kaçınılmazdır. İklimlendirme sistemlerinde ısı yük hesaplamaları için yaygın olan uygulamalardan birisi derece-gün yöntemidir. Bu yöntemin uygulanabilirliği bina ile ilgili parametrelerin değişken olmamasına bağlıdır. Buna karşılık bin yöntemi, derece-gün yönteminin eksik yönlerini tamamlayan ve uygulaması derece-gün yöntemi gibi basit olan bir yöntemdir. Bu yöntem, iç ve dış ortam sıcaklık farklarına dayanmaktadır. Derece-gün yönteminden farklı olarak, referans sıcaklığa göre sıcaklık farklarının gerçekleşme sayıları olan bin-değerleri kullanılmaktadır. Isıl yüklerin hesaplanmasında bin yönteminin kullanılması derece-gün yöntemine göre daha güvenilir ve daha hızlı sonuç elde edilmesini sağlamaktadır [1]-[3].

İklimlendirme sisteminin kurulacağı bölgenin iklim verileri, doğal soğutmadan elde edilebilecek faydanın belirlenmesinde en önemli unsurdur. İklimlendirme sistemi için daha proje aşamasında iken doğal soğutma uygulanmasının avantajlı olup olmadığının belirlenmesi ve sağlıklı bir yatırım kararı alınabilmesi önemlidir. Literatürde enerji tüketim ve geri dönüş hesaplamalarında kullanılan bin değerlerinin üretilmesi ile ilgili birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda bin değerleri, uygulama türüne göre hem bölgesel hem de genel olarak hesaplanmıştır. Yine yapılan çalışmalarda bin değerleri hesaplanırken; iki, üç veya dört saat aralıklarla ölçülen sıcaklık tekrar sıklıkları esas alınmıştır [4]-[11].

Tablo 1'de meteorolojik verilere göre Pusat ve Ekmekçi tarafından oluşturulan ve bu çalışmaya esas teşkil edecek olan Türkiye'de iklim bölgelerini temsil eden sekiz ile ait bin değerleri verilmiştir [12].

Tablo 1. Türkiye'deki sekiz ile ait bin verileri [2].
(Table 1. The bin data regarding eight provinces in Turkey)

Şehir	Isıtma derece-gün bölgesi (TSE2008)	Pusat ve Ekmekçi'ye göre iklim bölgesi (2010)	Yıllık Ort. Sic. (°C)	Günlük Ortalama güneşlenme Süresi (h)	Ölçüm Periyodu
İstanbul	2	Isıtma	15,0	6,1	1989-2006
Ankara	3	-	12,0	6,7	1989-2006
Trabzon	2	Soğutma	14,7	4,5	1989-2005
Van	4	-	9,2	7,8	1989-2007
Diyarbakır	2	Isıt/Soğut	15,8	7,7	1989-2008
Adana	1	-	19,1	7,4	1989-2008
Sivas	4	-	9,1	6,7	1989-2008
Denizli	2	Soğutma	16,2	7,2	1989-2006

İklimlendirme uygulamalarında doğal soğutma (free cooling), enerji tüketimlerinde önemli bir düşüş sağlamaktadır. Hava soğutmalı chillerlerin kullanım ve bakım kolaylığına karşılık, verim düşüklüğü ve işletme giderlerinin yüksekliği söz konusudur. Buna karşılık yıl boyu soğutma gereksinimi olan mevcut bir sistem kuru soğutucular ile desteklenerek doğal soğutma yapılabilir. Dış ortam sıcaklıklarının gerekli olan soğutma suyu sıcaklıklarının altına düşmesi ile birlikte doğal soğutma sistemleri kullanılır ve bu sayede önemli derecede enerji tasarrufu sağlanır [3], [13]-[14].

2. METOD (METHOD)

Yapılan çalışmada, kuru soğutucu ve hava soğutmalı chiller grubunun birlikte çalışması aşağıda yapılan kabuller doğrultusunda ele alınmıştır [14].

Soğutma gereksinimi olan tesis için; $T_{\text{soğutma suyu}} = 8^{\circ}\text{C}$ şarta sahip bir proses suyu soğutma sistemi olarak kabul edilmiştir. Sistemde 365 gün boyunca günlük 24 saat soğutma istenmektedir. Sistemdeki toplam soğutma yükü 500 kW kabul edilmiştir. Hesaplamalar ve karşılaştırmalar; sekiz iklim bölgesini temsilen İstanbul, Ankara, Trabzon, Van, Diyarbakır, Adana, Sivas ve Denizli illeri için yapılmıştır. Enerji analizi için üç farklı çalışma senaryosu aşağıdaki gibi kurgulanmıştır;

%100 Mekanik Soğutma - Ortam havası sıcaklığı, soğutma suyu dönüş sıcaklığının üzerinde olduğu zamanlar %100 chiller çalışması gereklidir. $T_{\text{ortam}} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girilir. Kondenser fanları ve kompresör %100 yükte çalışmaktadır ve yüke uygun olarak aralıklı

olarak devreye girip çıkmaktadırlar. %100 mekanik soğutma yapıldığında kuru soğutucu çalışmamaktadır.

Yük Paylaşımı Aralığı - $12^{\circ}\text{C} \geq T_{\text{ortam}} \geq 3^{\circ}\text{C}$ chiller ve kuru soğutucunun yük paylaşımını olarak çalıştıkları bölge olarak kabul edilmiştir. Ortam havası sıcaklığının dönüş suyu sıcaklığı en az 2°C altına düşmesi ile birlikte kuru soğutucu, ön soğutucu olarak çalışmaya başlamaktadır. Bunun sonucunda, dönüş suyu sıcaklığının düşmesi ile kompresör yükü de oransal olarak düşmektedir. Chiller kompresörünün oransal olarak kapasite kontrollü olduğu varsayılmış ve buna uygun chiller seçimi yapılmıştır. Ancak, hesaplamada kolaylık açısından belirli sıcaklıklar ve bu sıcaklıklara karşılık gelen oranlar kullanılmıştır. Oransal kontrol ile kazancın bir miktar daha fazla olacağı dikkate alınmalıdır. Kuru soğutucu fanlarının adım (step) kontrollü olarak çalıştığı kabul edilmiştir.

%100 Kuru Soğutucu Çalışma Aralığı - Doğal soğutma bölgesi ortam havası sıcaklığı soğutma suyu gidiş sıcaklığının en az 5°C altında ve daha düşük sıcaklıklarda tamamen kuru soğutucu çalışır ancak chiller çalışmaz.

Kabul edilen soğutma yükünü karşılayacak kuru soğutucu, Friterm firmasının ürün seçim yazılımı kullanılarak %100 doğal soğutma şartlarına göre ve %34 etilen/glikol oranı ile C enerji sınıfı FDW 2E 91 29 D312 3QD (18 fanlı) olarak belirlenmiştir. Soğutma kapasitesi 507 kW ve toplam güç tüketimi 20,7 kW'dır. Chiller, 511 kW soğutma kapasiteli hava soğutmalı vidalı kompresörlü Carrier 30XA-502 seçilmiştir [15]. Kuru soğutucunun farklı giriş sıcaklıklarındaki kapasite hesabı sabit akışkan debisi ile yapılmıştır. Pompalama güçleri karşılaştırma hesabına katılmamıştır. Enerji analizinde kullanılan chiller/kuru soğutuya ait veriler Şekil 1'de gösterilmiştir.



Chiller Model	Carrier 30XA-502	Friterm Kuru Soğutucu	
Soğutucu Akışkan	R134A	Model	FDW 2E 9129 D312 3QD
Kompresör Tipi	Vidalı	Akışkan	Etilen Glikol %34
Soğutma Kapasitesi (kW)	511	Kapasite (kW)	507
Soğutma Grubu Gücü (kW)	155	Fan Sayısı	18
Kompresör gücü (kW)	141	Toplam Fan Gücü (kW)	20,7

Şekil 1. Enerji analizinde kullanılan chiller ve kuru soğutucuya ait veriler [15]. (Figure 1. Data used regarding chiller and dry cooler energy analysis)

Hesap aralığı, $-6^{\circ}\text{C}/+33^{\circ}\text{C}$ olarak kabul edilmiştir. Kısmi bölge hesapları için kullanılan sıcaklık değerleri $3/6^{\circ}\text{C}$ aralığı için 5°C ; $6/9^{\circ}\text{C}$ aralığı için 8°C ; $9/12^{\circ}\text{C}$ aralığı için 11°C olarak kabul edilmiştir [14]. Kısmi soğutma bölgesinde suyun kuru soğutucudan çıkış sıcaklığı yaklaşık olarak hava giriş sıcaklığı ile suyun kuru soğutucuya giriş sıcaklığının ortalaması olarak kabul edilmiştir. %100 mekanik soğutmada dış hava sıcaklığı 12°C ve altına indiğinde soğutucu akışkan basıncı kondenser çıkışında çok düşeceğinden, kondenser fanları kademeli olarak kapatılarak kondenser çıkışında basınç sabit tutulmaktadır.

Kısmi soğutma bölgesinde kullanılan sıcaklık aralıklarında kuru soğutucunun ön soğutma yapması vasıtası ile oransal olarak kontrol edilebilen chillere düşen yük, sırası ile %60, %40 ve %20 olmaktadır. Hava giriş sıcaklığının düşmesiyle birlikte kuru soğutucu fanları kademeli olarak devreden çıktığından fan güçleri azalmaktadır. Hesaplamalarda kullanılan kuru soğutucu/chillerin kapasite, güç ve yük paylaşım oranları Tablo 2'de gösterilmektedir.

Tablo 2. Kuru soğutucu/chillerin kapasite, güç ve yük paylaşım oranları. (Table 2. Capacity, power and load sharing rates of dry cooler / chiller)

Çalışma Bölgesi	Hava Giriş Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Kuru Soğutucu Kapasitesi (kW)	Kuru Soğutucu Gücü (kW)	Kuru Soğutucu Kapasite/Güç Oranı	Kuru Soğutucu Yüklü (%)	Chiller Kapasitesi (kW)	Chiller Gücü (kW)	Chiller Kapasite/Güç Oranı	Chiller Yüklü (%)	Kuru Soğ.+Chiller Güç (kW)	Sistem Toplam Soğutma Kapasitesi (kW)
%100 Mekanik	30/33	0	0	0	0	511	155	3,3	100	155	511
	27/30	0	0	0	0	511	142	3,6	100	142	511
	24/27	0	0	0	0	511	126	4,0	100	126	511
	21/24	0	0	0	0	511	111	4,6	100	111	511
	18/21	0	0	0	0	511	95	5,4	100	95	511
	15/18	0	0	0	0	511	79	6,5	100	79	511
	12/15	0	0	0	0	511	63	8,1	100	63	511
Kısmi	9/12	203	8	25	40	307	93	3,3	60	101	509
	6/9	304	13	24	60	204	62	3,3	40	75	509
	3/6	406	17	24	80	102	31	3,3	20	48	508
%100 Doğal	0/3	507	18	20	100	0	-	-	0	18	507
	-3/0	507	12	19	100	0	-	-	0	12	507
	-6/-3	507	6	17	100	0	-	-	0	6	507

Sonuç olarak, aşağıdaki tablolarda sekiz ile ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryoları sonucunda enerji kazancı ve geri dönüş sürelerine ilişkin veriler elde edilmiştir.

Tablo 3. İstanbul iline ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryosu
(Table 3. Dry cooler/chiller operation scenario for İstanbul)

<i>İstanbul Bin Değerleri</i>	53	207	606	1075	998	1011	1112	863	1072	928	544	275	16	
Sıcaklık Aralığı (°C)	-6/-3	-3/0	0/3	3/6	6/9	9/12	12/15	15/18	18/21	21/24	24/27	27/30	30/33	
<i>%100 MEKANİK SOĞUTMA</i>														
Harcanan Enerji (kWh) *	30	40	50	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
Harcanan Toplam Enerji (KWh)	1590	8280	30300	69875	74850	85935	105640	90615	123280	116000	73440	39875	2480	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Enerji Bedeli (€)	159	828	3030	6988	7485	8594	10564	9062	12328	11600	7344	3988	248	
TOPLAM Enerji Bedeli	82.216 €													
	<i>KURU SOĞUTUCU</i>			<i>KURU SOĞUTUCU VE CHILLER</i>			<i>CHILLER</i>							
Harcanan Enerji (kWh)	6	12	18	48	75	101	63	79	95	111	126	142	155	
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	305	2381	11150	51170	74501	102111	70278	68177	101626	102637	68762	39105	2480	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Harcanan Enerji Bedeli (€)	30	238	1115	5117	7450	10211	7028	6818	10163	10264	6876	3911	248	
TOPLAM Harcanan Enerji Bedeli	69.468 €													
HESAPLAR	YILLIK KAZANÇ (EURO)					ENERJİ KAZANCI (%)					Geri Dönüş (Yıl)			
	12.748 €					16					5,9			
* Zamana bağlı bir yük profilimiz olmadığından, talep edilen soğutmanın zaman içinde sabit olduğunu kabul ettik. Dış hava değişimine göre enerji sarfiyatındaki değişim gözönüne alındı. Chiller kataloğundan min kapasite, tam kapasitenin en az %15 i (25 kW) olabilir bilgisi edinilmiştir.														
* Hesaplamalarda karşılanması gereken soğutma yükünün 24 saat boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir.														
* Hesaplamalarda karşılanması gereken soğutma yükünün 24 saat boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. Chiller, dış tasarım sıcaklığı 35 C olduğundan en fazla 33 C ye kadar gidilmiştir.														

Tablo 4. Ankara iline ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryosu
(Table 4. Dry cooler/chiller operation scenario for Ankara)

Ankara Bin Değerleri	264	593	944	987	753	666	835	905	717	707	532	366	250	
Sıcaklık Aralığı (°C)	-4/-7	-4/-1	-1/2	2/5	5/8	8/11	11/14	14/17	17/20	20/23	23/26	26/29	29/32	
<i>%100 MEKANİK SOĞUTMA</i>														
Harcanan Enerji (kWh) *	30	40	50	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
Harcanan Toplam Enerji (KWh)	7920	23720	47200	64155	56475	56610	79325	95025	82455	88375	71820	53070	38750	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Enerji Bedeli (€)	792	2372	4720	6416	5648	5661	7933	9503	8246	8838	7182	5307	3875	
TOPLAM Enerji Bedeli	76.490 €													
	<i>KURU SOĞUTUCU</i>			<i>KURU SOĞUTUCU VE CHILLER</i>			<i>CHILLER</i>							
Harcanan Enerji (kWh)	6	12	18	48	75	101	63	79	95	111	126	142	155	
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	1518	6820	17370	46981	56211	67266	52772	71495	67972	78194	67245	52045	38750	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Harcanan Enerji Bedeli (€)	152	682	1737	4698	5621	6727	5277	7150	6797	7819	6724	5205	3875	
TOPLAM Harcanan Enerji Bedeli	62.464 €													
HESAPLAR	YILLIK KAZANÇ (EURO)					ENERJİ KAZANCI (%)					Geri Dönüş (Yıl)			
	14.026 €					18					5,3			

Tablo 5. Trabzon iline ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryosu
(Table 5. Dry cooler/chiller operation scenario for Trabzon)

Trabzon Bin Değerleri	0	114	418	1110	1314	991	797	994	1290	1107	477	129	14	
Sıcaklık Aralığı (°C)	-6/-3	-3/0	0/3	3/6	6/9	9/12	12/15	15/18	18/21	21/24	24/27	27/30	30/33	
%100 MEKANİK SOĞUTMA														
Harcanan Enerji (kWh) *	30	40	50	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
Harcanan Toplam Enerji (KWh)	0	4560	20900	72150	98550	84235	75715	104370	148350	138375	64395	18705	2170	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Enerji Bedeli (€)	0	456	2090	7215	9855	8424	7572	10437	14835	13838	6440	1871	217	
TOPLAM Enerji Bedeli	83.248 €													
	KURU SOĞUTUCU			KURU SOĞUTUCU/CHILLER			CHILLER							
Harcanan Enerji (kWh)	6	6	12	18	48	75	101	63	79	95	111	126	142	
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	0	656	4807	20424	62546	73978	80497	62821	101910	104944	52756	16306	1991	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Harcanan Enerji Bedeli (€)	0	66	481	2042	6255	7398	8050	6282	10191	10494	5276	1631	199	
TOPLAM Harcanan Enerji Bedeli	58.364 €													
HESAPLAR	YILLIK KAZANÇ (EURO)					ENERJİ KAZANCI (%)					Geri Dönüş (Yıl)			
	24.884 €					30					3,0			

Tablo 6. Van iline ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryosu
(Table 6. Dry cooler/chiller operation scenario for Van)

Van Bin Değerleri	463	742	889	906	990	893	618	637	678	624	520	266	22	
Sıcaklık Aralığı (°C)	-6/-3	-3/0	0/3	3/6	6/9	9/12	12/15	15/18	18/21	21/24	24/27	27/30	30/33	
%100 MEKANİK SOĞUTMA														
Harcanan Enerji (kWh) *	30	40	50	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
Harcanan Toplam Enerji (KWh)	13890	29680	44450	58890	74250	75905	58710	66885	77970	78000	70200	38570	3410	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Enerji Bedeli (€)	1389	2968	4445	5889	7425	7591	5871	6689	7797	7800	7020	3857	341	
TOPLAM Enerji Bedeli	69.081 €													
	KURU SOĞUTUCU			KURU SOĞUTUCU VE CHILLER			CHILLER							
Harcanan Enerji (kWh)	6	6	12	18	48	75	101	63	79	95	111	126	142	
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	2662	4267	10224	16670	47124	66662	62418	40258	53562	59155	57512	33622	3128	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Harcanan Enerji Bedeli (€)	266	427	1022	1667	4712	6666	6242	4026	5356	5916	5751	3362	313	
TOPLAM Harcanan Enerji Bedeli	45.727 €													
HESAPLAR	YILLIK KAZANÇ (EURO)					ENERJİ KAZANCI (%)					Geri Dönüş (Yıl)			
	23.354 €					34					3,2			

Tablo 7. Diyarbakır iline ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryosu
(Table 7. Dry cooler/chiller operation scenario for Diyarbakır)

Diyarbakır Bin Değerleri	243	354	701	722	822	703	794	685	610	628	558	490	477	
Sıcaklık Aralığı (°C)	-7/-4	-4/-1	-1/2	2/5	5/8	8/11	11/14	14/17	17/20	20/23	23/26	26/29	29/32	
%100 MEKANİK SOĞUTMA														
Harcanan Enerji (kWh) *	30	40	50	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
Harcanan Toplam Enerji (KWh)	7290	14160	35050	46930	61650	59755	75430	71925	70150	78500	75330	71050	73935	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Enerji Bedeli (€)	729	1416	3505	4693	6165	5976	7543	7193	7015	7850	7533	7105	7394	
TOPLAM Enerji Bedeli	74.116 €													
	KURU SOĞUTUCU			KURU SOĞUTUCU VE CHILLER			CHILLER							
Harcanan Enerji (kWh)	6	12	18	48	75	101	63	79	95	111	126	142	155	
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	1397	4071	12898	34367	61362	71003	50181	54115	57828	69457	70531	69678	73935	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Harcanan Enerji Bedeli (€)	140	407	1290	3437	6136	7100	5018	5412	5783	6946	7053	6968	7394	
TOPLAM Harcanan Enerji Bedeli	63.082 €													
HESAPLAR	YILLIK KAZANÇ (EURO)					ENERJİ KAZANCI (%)					Geri Dönüş (Yıl)			
	11.033 €					15					6,8			

Tablo 8. Adana iline ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryosu
(Table 8. Dry cooler/chiller operation scenario for Adana)

Adana Bin Değerleri	0	23	78	338	925	1056	862	928	901	871	985	907	603	
Sıcaklık Aralığı (°C)	-6/-3	-3/0	0/3	3/6	6/9	9/12	12/15	15/18	18/21	21/24	24/27	27/30	30/33	
%100 MEKANİK SOĞUTMA														
Harcanan Enerji (kWh) *	30	40	50	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
Harcanan Toplam Enerji (KWh)	0	920	3900	21970	69375	89760	81890	97440	103615	108875	132975	131515	93465	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Enerji Bedeli (€)	0	92	390	2197	6938	8976	8189	9744	10362	10888	13298	13152	9347	
TOPLAM Enerji Bedeli	93.570 €													
	KURU SOĞUTUCU			KURU SOĞUTUCU VE CHILLER			CHILLER							
Harcanan Enerji (kWh)	6	12	18	48	75	101	63	79	95	111	126	142	155	
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	0	265	1435	16089	69051	106656	54478	73312	85415	96333	124504	128975	93465	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Harcanan Enerji Bedeli (€)	0	26	144	1609	6905	10666	5448	7331	8541	9633	12450	12898	9347	
TOPLAM Harcanan Enerji Bedeli	84.998 €													
HESAPLAR	YILLIK KAZANÇ (EURO)					ENERJİ KAZANCI (%)					Geri Dönüş (Yıl)			
	8.572 €					9					8,7			

Tablo 9. Sivas iline ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryosu
(Table 9. Dry cooler/chiller operation scenario for Sivas)

Sivas Bin Değerleri	726	675	687	796	836	913	869	741	608	394	323	199	88	
Sıcaklık Aralığı (°C)	-6/-3	-3/0	0/3	3/6	6/9	9/12	12/15	15/18	18/21	21/24	24/27	27/30	30/33	
<i>%100 MEKANİK SOĞUTMA</i>														
Harcanan Enerji (kWh) *	30	40	50	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
Harcanan Toplam Enerji (KWh)	21780	27000	34350	51740	62700	77605	82555	77805	69920	49250	43605	28855	13640	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Enerji Bedeli (€)	2178	2700	3435	5174	6270	7761	8256	7781	6992	4925	4361	2886	1364	
TOPLAM Enerji Bedeli	64.081 €													
	<i>KURU SOĞUTUCU</i>			<i>KURU SOĞUTUCU VE CHILLER</i>			<i>CHILLER</i>							
Harcanan Enerji (kWh)	6	12	18	48	75	101	63	79	95	111	126	142	155	
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	4175	7763	12641	37890	62407	92213	54921	58539	57638	43576	40827	28298	13640	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Harcanan Enerji Bedeli (€)	417	776	1264	3789	6241	9221	5492	5854	5764	4358	4083	2830	1364	
TOPLAM Harcanan Enerji Bedeli	51.453 €													
HESAPLAR	YILLIK KAZANÇ (EURO)					ENERJİ KAZANCI (%)					Geri Dönüş (Yıl)			
	12.628 €					20					5,9			

Tablo 10. Denizli iline ait kuru soğutucu/chiller birlikte çalışma senaryosu
(Table 10. Dry cooler / chiller operation scenario for Denizli)

Denizli Bin Değerleri	0	74	392	790	983	1041	768	685	792	891	881	653	417	
Sıcaklık Aralığı (°C)	-4/-7	-4/-1	-1/2	2/5	5/8	8/11	11/14	14/17	17/20	20/23	23/26	26/29	29/32	
<i>%100 MEKANİK SOĞUTMA</i>														
Harcanan Enerji (kWh) *	30	40	50	65	75	85	95	105	115	125	135	145	155	
Harcanan Toplam Enerji (KWh)	0	2960	19600	51350	73725	88485	72960	71925	91080	111375	118935	94685	64635	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Enerji Bedeli (€)	0	296	1960	5135	7373	8849	7296	7193	9108	11138	11894	9469	6464	
TOPLAM Enerji Bedeli	86.172 €													
	<i>KURU SOĞUTUCU</i>			<i>KURU SOĞUTUCU VE CHILLER</i>			<i>CHILLER</i>							
Harcanan Enerji (kWh)	6	12	18	48	75	101	63	79	95	111	126	142	155	
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	0	851	7213	37604	73381	105141	48538	54115	75082	98545	111358	92857	64635	
Saatlik Enerji Bedeli (€/kWh)	0,10 €													
Harcanan Enerji Bedeli (€)	0	85	721	3760	7338	10514	4854	5412	7508	9854	11136	9286	6464	
TOPLAM Harcanan Enerji Bedeli	76.932 €													
HESAPLAR	YILLIK KAZANÇ (EURO)					ENERJİ KAZANCI (%)					Geri Dönüş (Yıl)			
	9.240 €					11					8,1			

Sekiz ile ait olan farklı çalışma senaryolarına göre elde edilen bulgular grafik ortamda gösterilmiş ve değerlendirilmiştir.

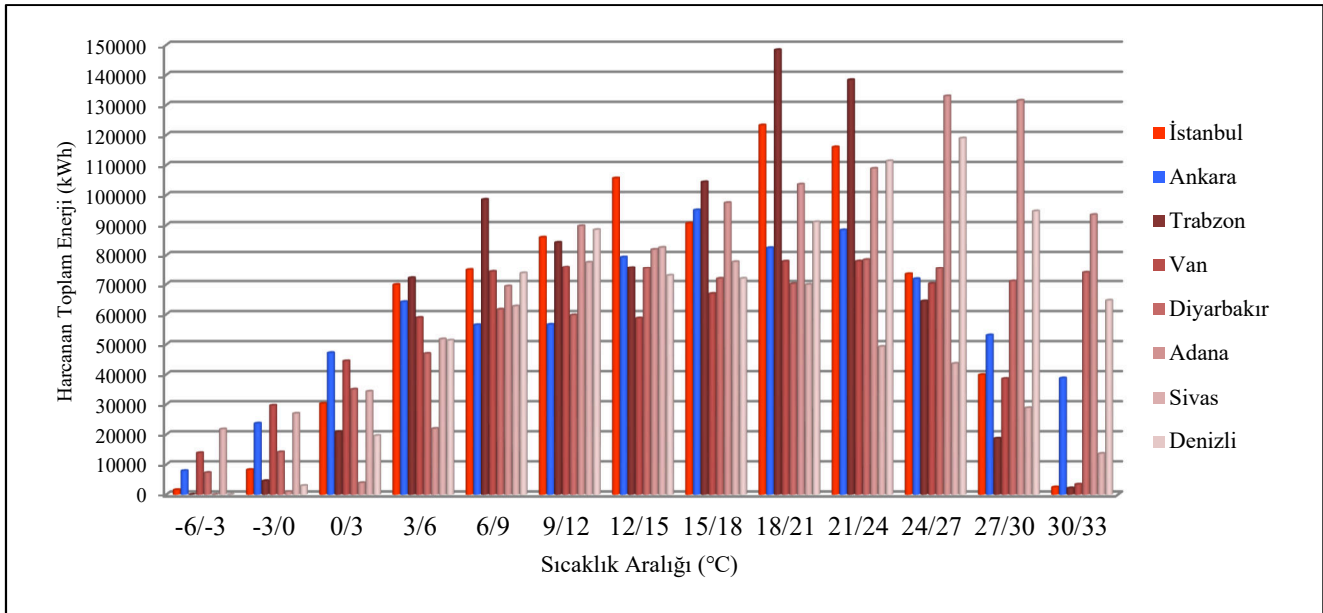
3. BULGULAR (RESULTS)

Bu bölümde, yıllık enerji tüketim değerlerine bağlı olarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Tablo 11’de %100 mekanik soğutma ve chiller-kuru soğutucu ikilisinin beraber çalışma senaryoları sonucunda elde edilen enerji tüketimleri gösterilmiştir.

Tablo 11. Sekiz il için bin değerlerine göre %100 mekanik soğutma ve chiller-kuru soğutucu ikilisinin beraber çalışma senaryoları sonucunda elde edilen enerji tüketimleri (kWh/Yıl). (Table 11. According to the bin values of the eight provinces, energy consumptions obtained as a result of 100% mechanical refrigeration and co-operating scenario of the chiller-dry cooler pair (kWh/Year))

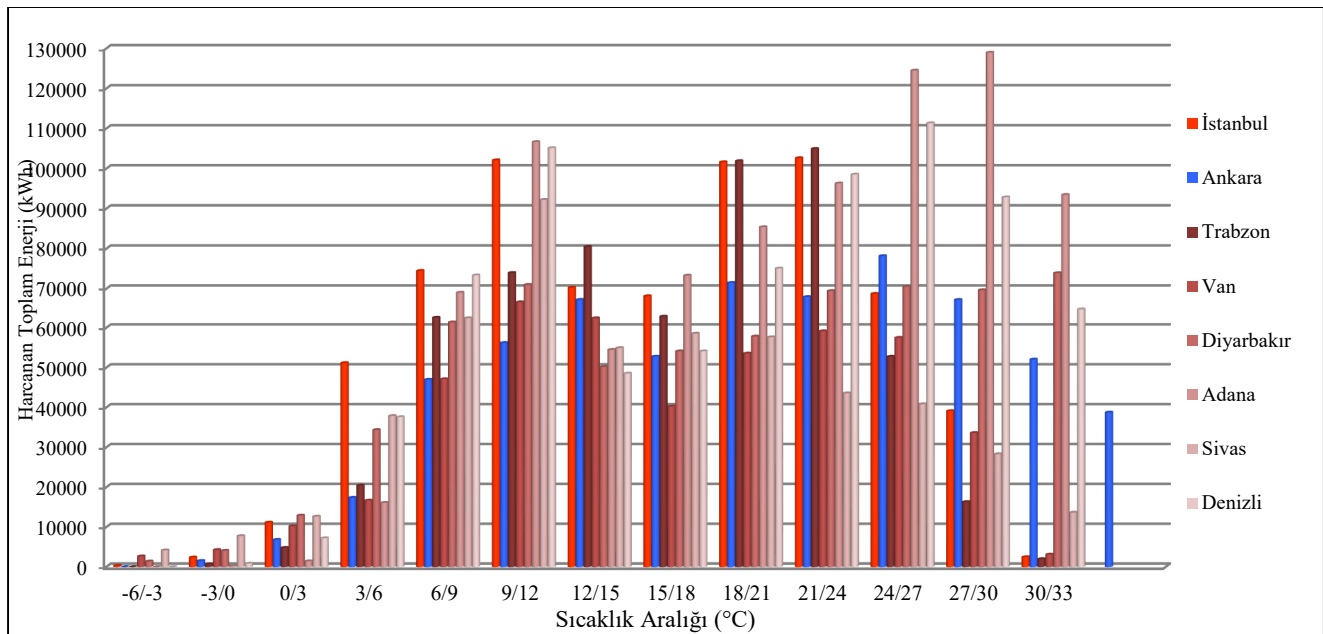
%100 Mekanik Soğutma													
Sıcaklık Aralığı (°C)	-6/-3	-3/0	0/3	3/6	6/9	9/12	12/15	15/18	18/21	21/24	24/27	27/30	30/33
İstanbul													
Harcanan Toplam Enerji -İSTANBUL (kWh)	1590	8280	30300	69875	74850	85935	105640	90615	123280	116000	73440	39875	2480
Ankara													
Harcanan Toplam Enerji-ANKARA (kWh)	7920	23720	47200	64155	56475	56610	79325	95025	82455	88375	71820	53070	38750
Trabzon													
Harcanan Toplam Enerji-TRABZON (kWh)	0	4560	20900	72150	98550	84235	75715	104370	148350	138375	64395	18705	2170
Van													
Harcanan Toplam Enerji-VAN (kWh)	13890	29680	44450	58890	74250	75905	58710	66885	77970	78000	70200	38570	3410
Diyarbakır													
Harcanan Toplam Enerji-DİYARBAKIR (kWh)	7290	14160	35050	46930	61650	59755	75430	71925	70150	78500	75330	71050	73935
Adana													
Harcanan Toplam Enerji-ADANA (kWh)	0	920	3900	21970	69375	89760	81890	97440	103615	108875	132975	131515	93465
Sivas													
Harcanan Toplam Enerji-SİVAS (kWh)	21780	27000	34350	51740	62700	77605	82555	77805	69920	49250	43605	28855	13640
Denizli													
Harcanan Toplam Enerji-DENİZLİ (kWh)	0	2960	19600	51350	73725	88485	72960	71925	91080	111375	118935	94685	64635
Kuru Soğutucu + Chiller													
Sıcaklık Aralığı (°C)	-6/-3	-3/0	0/3	3/6	6/9	9/12	12/15	15/18	18/21	21/24	24/27	27/30	30/33
İstanbul													
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	305	2381	11150	51170	74501	102111	70278	68177	101626	102637	68762	39105	2480
Ankara													
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	1518	6820	17370	46981	56211	67266	52772	71495	67972	78194	67245	52045	38750
Trabzon													
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	0	656	4807	20424	62546	73978	80497	62821	101910	104944	52756	16306	1991
Van													
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	2662	4267	10224	16670	47124	66662	62418	40258	53562	59155	57512	33622	3128
Diyarbakır													
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	1397	4071	12898	34367	61362	71003	50181	54115	57828	69457	70531	69678	73935
Adana													
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	0	265	1435	16089	69051	106656	54478	73312	85415	96333	124504	128975	93465
Sivas													
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	4175	7763	12641	37890	62407	92213	54921	58539	57638	43576	40827	28298	13640
Denizli													
Harcanan Toplam Enerji (kWh)	0	851	7213	37604	73381	105141	48538	54115	75082	98545	111358	92857	64635

Tablo 11’de bulunan değerlere göre, sekiz ilin %100 mekanik soğutma yapılması durumunda yıllık enerji tüketimlerine göre karşılaştırmaları Şekil 2’de gösterilmektedir.



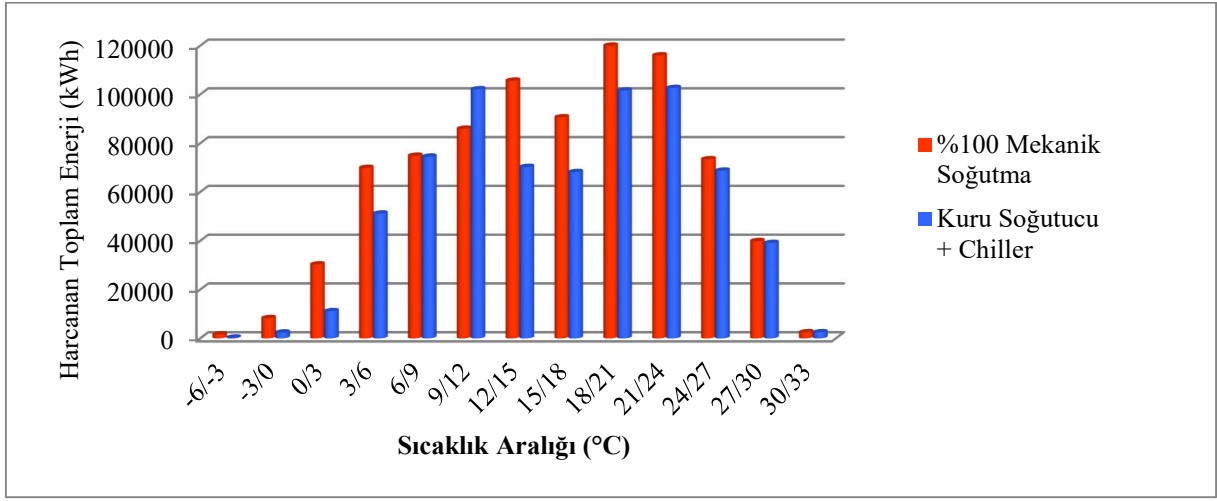
Şekil 2. Sekiz ilin %100 mekanik soğutmada enerji kıyaslaması
(Figure 2. Energy comparison of eight provinces at 100% mechanical refrigeration)

Tablo 11’de bulunan değerlere göre, sekiz ilin kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumundaki yıllık enerji tüketimlerine göre karşılaştırmaları Şekil 3’de gösterilmektedir.



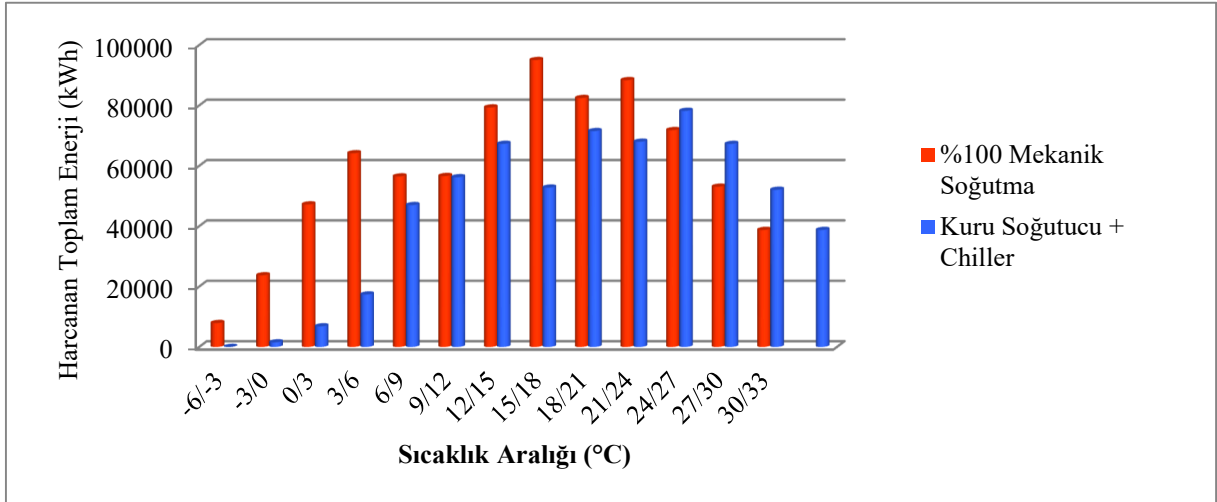
Şekil 3. Sekiz ilin Kuru Soğutucu+Chiller Enerji Karşılaştırması
(Figure 3. Dry Cooler + Chiller Energy Comparisons of eight provinces)

Şekil 2 ve Şekil 3’de görüleceği üzere, sekiz ilin tamamında 3-12 °C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama %12 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{ortam} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33 °C dış ortam sıcaklıklarında aynı enerji analizi sekiz il için yapıldığında % 23 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. Aşağıdaki şekillerde sekiz ilin ait yıllık enerji tüketim değerleri bin değerlerine göre ayrı ayrı gösterilmiştir.



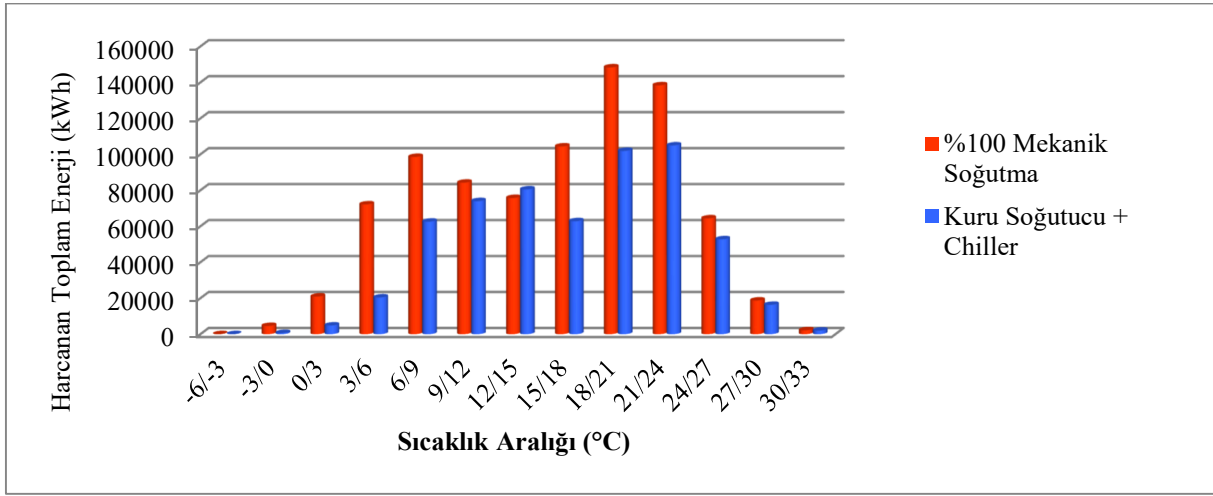
Şekil 4. İstanbul ili için %100 Mekanik Soğutma ve Chiller+Kuru Soğutucu Çalışma Karşılaştırılması
(Figure 4. Comparison of 100% Mechanical Refrigeration and Chiller + Dry Cooler Operation for Istanbul)

Şekil 4’de görüleceği üzere, 3-12°C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama % 1 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{\text{ortam}} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33°C dış ortam sıcaklıklarında İstanbul için aynı enerji analizi yapıldığında % 22 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir.



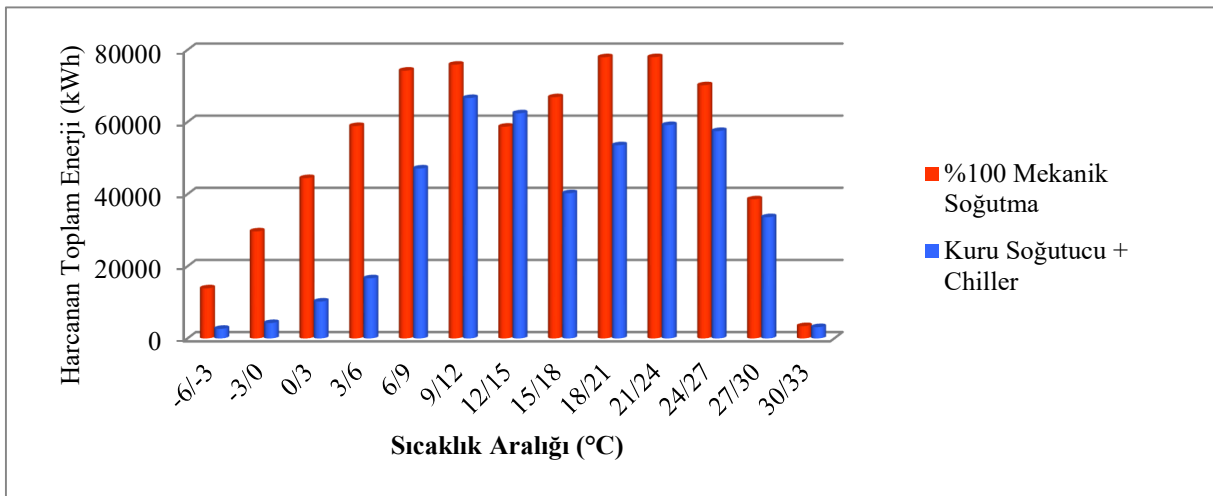
Şekil 5. Ankara ili için %100 Mekanik Soğutma ve Chiller+Kuru Soğutucu Çalışma Karşılaştırılması
(Figure 5. Comparison of 100% Mechanical Refrigeration and Chiller + Dry Cooler Operation for Ankara)

Şekil 5’de Ankara’da görüleceği üzere, 3-12°C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama % 4 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{\text{ortam}} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33 °C dış ortam sıcaklıklarında Ankara için aynı enerji analizi yapıldığında % 19 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir.



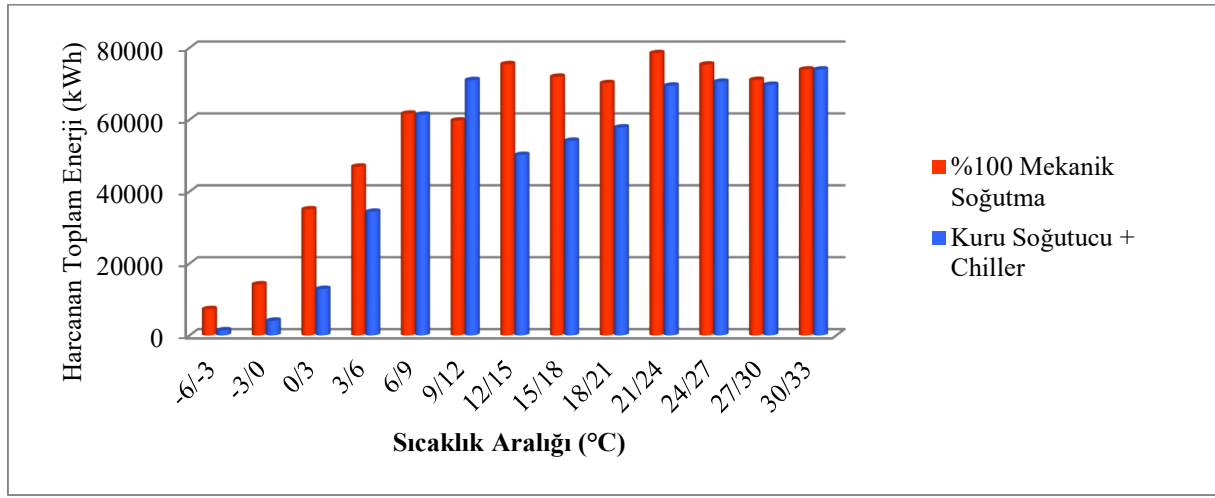
Şekil 6. Trabzon ili için %100 Mekanik Soğutma ve Chiller+Kuru Soğutucu Çalışma Karşılaştırılması
(Figure 6. Comparison of 100% Mechanical Refrigeration and Chiller + Dry Cooler Operation for Trabzon)

Şekil 6’da görüleceği üzere, 3-12 °C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama % 60 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{ortam} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33 °C dış ortam sıcaklıklarında Trabzon için aynı enerji analizi yapıldığında % 31 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir.



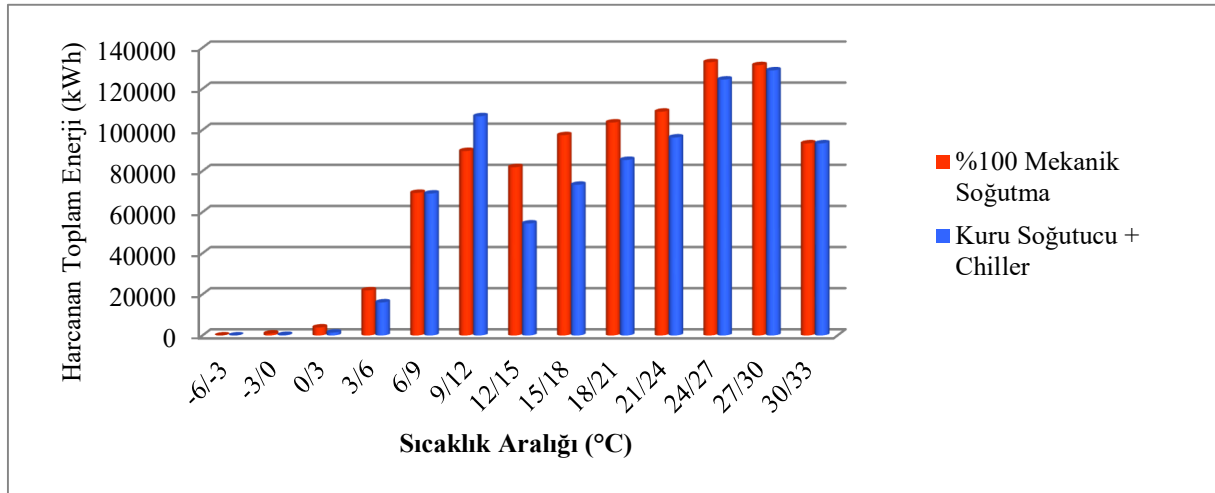
Şekil 7. Van ili için %100 Mekanik Soğutma ve Chiller+Kuru Soğutucu Çalışma Karşılaştırılması
(Figure 7. Comparison of 100% Mechanical Refrigeration and Chiller + Dry Cooler Operation for Van)

Şekil 7’de görüleceği üzere, 3-12 °C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama % 60 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{ortam} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33 °C dış ortam sıcaklıklarında Van için aynı enerji analizi yapıldığında % 27 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir.



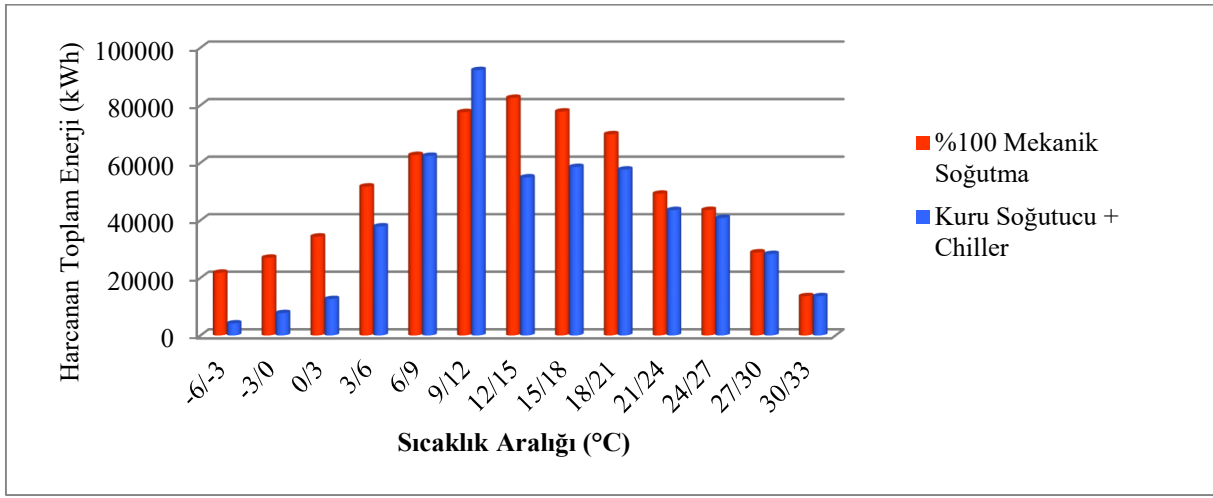
Şekil 8. Diyarbakır ili için %100 Mekanik Soğutma ve Chiller+Kuru Soğutucu Çalışma Karşılaştırılması
(Figure 8. Comparison of 100% Mechanical Refrigeration and Chiller + Dry Cooler Operation for Diyarbakır)

Şekil 8’de görüleceği üzere, 3-12 °C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama % 1 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{ortam} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33 °C dış ortam sıcaklıklarında Diyarbakır için aynı enerji analizi yapıldığında % 16 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir.



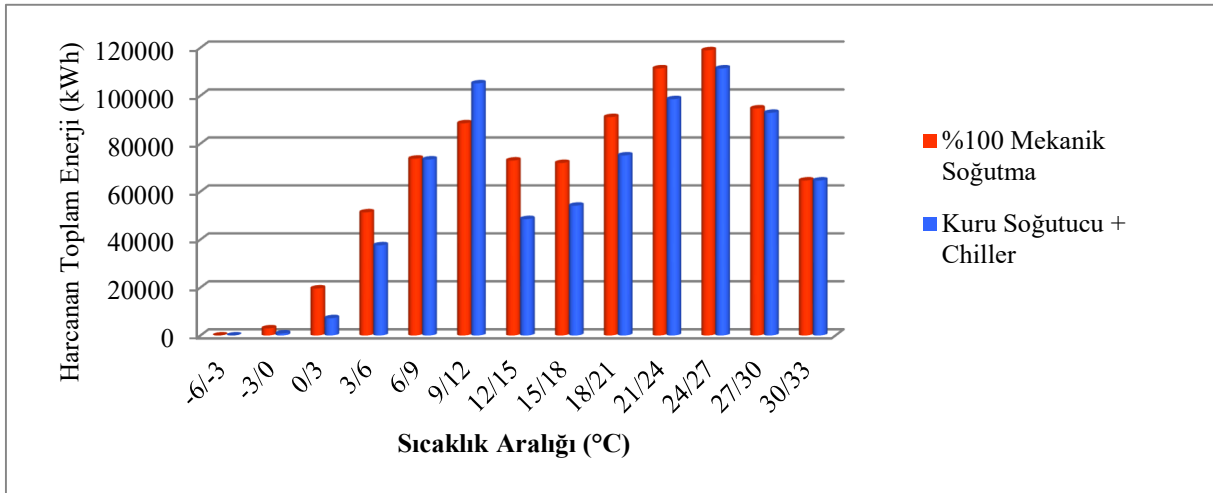
Şekil 9. Adana ili için %100 Mekanik Soğutma ve Chiller+Kuru Soğutucu Çalışma Karşılaştırılması
(Figure 9. Comparison of 100% Mechanical Refrigeration and Chiller + Dry Cooler Operation for Adana)

Şekil 9’da görüleceği üzere, 3-12 °C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama % 1 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{ortam} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33 °C dış ortam sıcaklıklarında Adana için aynı enerji analizi yapıldığında % 14 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir.



Şekil 10. Sivas ili için %100 Mekanik Soğutma ve Chiller+Kuru Soğutucu Çalışma Karşılaştırılması
(Figure 10. Comparison of 100% Mechanical Refrigeration and Chiller + Dry Cooler Operation for Sivas)

Şekil 10'da görüleceği üzere, 3-12 °C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama % 1 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{ortam} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33 °C dış ortam sıcaklıklarında Sivas için aynı enerji analizi yapıldığında % 23 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir.



Şekil 11. Denizli ili için %100 Mekanik Soğutma ve Chiller+Kuru Soğutucu Çalışma Karşılaştırılması
(Figure 11. Comparison of 100% Mechanical Refrigeration and Chiller + Dry Cooler Operation for Denizli)

Şekil 11'de görüleceği üzere, 3-12 °C dış ortam sıcaklıklarında kuru soğutucu-chiller birlikte çalışması durumunda, yıllık olarak %100 mekanik soğutmaya (chiller) göre ortalama % 1 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir. İşletme senaryosu gereği, $T_{ortam} > 12^{\circ}\text{C}$ olduğu zaman mekanik soğutma bölgesine girildiğinden sadece chiller çalışacaktır. 12 – 33 °C dış ortam sıcaklıklarında Denizli için aynı enerji analizi yapıldığında % 15 daha az enerji tüketimi gerçekleşmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)



Sekiz il için bin değerlerine dayalı olarak enerji analizleri yapılarak, sadece mekanik soğutma ve chiller+kuru soğutucunun beraber çalıştığı işletme koşullarında ilgili tablolarda karşılaştırmalı sonuçlara yer verilmiştir.

Tablolarda her ilin ayrı ayrı geri ödeme süreleri, enflasyon ve mevcut faiz oranlarından bağımsız olarak hesaplanmıştır. Tüm bu iller için ortalama geri ödeme süresinin 5,8 yıl olduğu görülmüştür. Soğutma sisteminin kurulu olduğu veya kurulacağı bölgenin iklim koşulları ile istenen soğutma suyu sıcaklıkları doğal soğutmadan elde edilebilecek faydanın belirlenmesinde en önemli unsurlardır. Yıl boyu soğutma suyu kullanan ve mevcut bir hava soğutmalı chiller sistemi olan tesisler için gerekli soğutma yükünü karşılayacak bir kuru soğutucu seçilerek, bu entegrasyon sonucundaki enerji maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, yoğun enerji tüketiminin olduğu konfor/endüstriyel soğutma tesislerinde, sürdürülebilir çevre ve işletme maliyetlerinin azaltılması açısından kuru soğutucuların çok önemli bir katkı sağladığı görülmüştür.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] H. Acül, “Kuru Soğutuculu Doğal Soğutma Uygulamaları ile İklimlendirme Sistemlerinde Enerji Verimliliği”, *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi (Teskon)*, İzmir, 1999, pp. 83-114.
- [2] Ş. Pusat, İ. Ekmekçi, M.T. Akkoyunlu, “Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey”, *Renewable Energy*, vol.75, pp.144-151, 2015.
- [3] K. İsa, A. Onat, “İklimlendirme Soğutma Sistemlerinde Enerji Verimliliği”, Friterm Yayınları, İstanbul, ISBN: 978-975-6263-22-8, 2012.
- [4] Ö. Özyurt, K. Bakirci, S. Erdoğan, M. Yılmaz, “Bin weather data for the provinces of the Eastern Anatolia in Turkey”, *Renewable Energy*, Vol. 34, No. 5, pp.1319–1332, 2009.
- [5] M. Kensarin, K. Kamola, “Energy saving potential in the residential sector of Uzbekistan”, *Energy*, 32(8), 1319–25, 2007.
- [6] Z. Jin, W. Yezheng, Y. Gang, “A stochastic method to generate bin weather data in Nanjing, China”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, Nos. 13–14, pp.1843–1850, 2006.
- [7] O. Büyükalaca, H. Bulut, “Detailed weather data for the provinces covered by the Southeastern Anatolia Project (GAP) of Turkey”, *Applied Energy*, Vol. 77, No. 2, pp.187–204, 2004.
- [8] H. Bulut, O. Büyükalaca, T. Yılmaz, “Binalarda Enerji Tüketiminin Sıcaklık Aralığı (Bin) Yöntemi ile Belirlenmesi”, *II. Doğalgaz & Enerji Yönetimi Kongresi*, Gaziantep, pp.193-207, 2003.
- [9] H. Bulut, O. Büyükalaca, T. Yılmaz, “Bin weather data for Turkey”, *Applied Energy*, Vol. 70, No. 2, pp.135–155, 2001.
- [10] K.T. Papakostas, B.A. Sotiropoulos, “Bin weather data of Thessaloniki, Greece”, *Renewable Energy*, Vol. 11, No. 1, pp.69–76, 1997.
- [11] K.T. Papakostas, “Bin weather data of Athens, Greece”. *Renewable Energy*, 17:265–75, 1999.
- [12] Ş. Pusat, İ. Ekmekçi, “A study on degree-regions of Turkey”, *Energy Efficiency*, 9(2), 525-532, 2016.
- [13] K. İsa, “Plastik Endüstrisinde Soğutma Sistemleri ve Uygulamaları”, Friterm Yayınları, İstanbul, ISBN: 978-975-6263-32-7, 2017.
- [14] K. İsa, Ü. Güngör, S. Aydın, “İstanbul ve Konya İçin Chiller-Kuru Soğutucu Çiftinin Enerji Analizi”, *Termoklima Dergisi*, İstanbul, pp.116-121, Temmuz 2016.
- [15] Alarko-Carrier A.Ş., *Carrier 30XA Hava Soğutmalı Chiller Ürün Seçim Kitabı*, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 07-07-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 10-10-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.327245	

Atık sulardan metallerin gideriminde fındık kabuğunun adsorbent olarak kullanılması: Adsorpsiyon mekanizması ve kinetik modelleme

Özlem Tunç Dede*¹

ÖZ

Bu çalışmada, atık sulardan Al, Fe, Pb, Cr, Cu, As ve Cd metallerinin aynı anda gideriminde tarımsal bir atık olan fındık kabuğu adsorbent olarak kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar adsorpsiyonun ortam pH'ı ve sıcaklığından önemli ölçüde etkilendiğini göstermiştir. Optimum pH 5.0 ve optimum sıcaklık 22°C olarak bulunmuştur. Başlangıç metal derişiminin etkisi 0.5-20 mg L⁻¹ aralığında değişen derişimlerde, adsorbent miktarının etkisi ise 1-20 g L⁻¹ aralığında incelenmiştir. Başlangıç metal derişimi 10 mg L⁻¹'e kadar arttıkça giderim değerleri kadmiyum genel olarak artış eğilimi göstermiştir. Adsorbent miktarının ise 10 g L⁻¹'e kadar artması ile giderimin arttığı, daha ileri bir artışın sonuçları önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür. Adsorpsiyon mekanizmasının incelenmesi ve hız kısıtlayıcı basamağın belirlenmesi amacıyla, deneysel verilere basit kütle aktarımı ve kinetik modeller uygulanmıştır. Her bir kirletici metalin adsorpsiyonunda hem dış kütle aktarımının hem de iç difüzyonun önemli bir rol oynadığı bulunmuştur. Adsorpsiyon kinetiğinin ise ikinci derece kinetik modele uyum sağladığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Su kirliliği, metal, tarımsal atık, adsorbent, giderim.

The use of hazelnut shell as an adsorbent for the removal of metals from waste waters: Adsorption mechanism and kinetic modelling

ABSTRACT

In this study, an agricultural waste - hazel nut shell – were used as a sorbent for the simultaneous removal of Al, Fe, Pb, Cr, Cu, As ve Cd pollutants from waste waters. The obtained results indicated that adsorption significantly depends on medium pH and temperature. The optimum pH and optimum temperature were found as 5.0 and 22°C, respectively. The effect of initial metal concentration was investigated between 0.5-20 mg L⁻¹ and adsorbent amount is between 1-20 g L⁻¹. The removal amounts were increased by increasing initial metal concentration upto 10 mg L⁻¹ except cadmium. The increasing of adsorbent amounts up to 10 g L⁻¹'e increased the removal, but further increasing did not effect the results significantly. Simple mass transfer and kinetic models were applied to the data obtained during adsorption experiment in order to examine the adsorption mechanism and determine the rate controlling step. It was found that both external mass transfer and intraparticle diffusion played an important role in the adsorption mechanism of each metal pollutant and adsorption kinetics followed the pseudo second order type kinetic model.

Keywords: Water pollution, metal, agricultural waste, adsorbent, removal.

¹ Environmental Engineering Department, Giresun University, 28200, Giresun /Turkey, ozlem@tuncdede.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Su, dünyada tüm canlıların yaşamını sürdürebilmesi için gerekli olan ve korunması gereken en önemli doğal kaynaklardan biridir. Günümüzde, nüfusun artması ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte evsel atıklar, sanayi atıkları, tarımda kullanılan kimyasal gübreler, zirai mücadele ilaçları vb. gibi birçok etmen su kirliliğini de beraberinde getirmektedir. Maden, metalürji, tekstil ve kimya gibi endüstrilerin hızla gelişmesi sonucu ise özellikle ağır metal içeren atık sular en önemli çevre sorunlarından biri haline gelmiştir. Ağır metaller, doğada uzun süre kalabilmekte ve insan ve sucul ortamlardaki canlılar üzerinde toksik etkilere ve ölümlere neden olabilmektedirler. Bu nedenle sulardan ağır metallerin giderilmesi son derece önemlidir [1]-[12].

Literatürde yapılan çalışmalar, demir (Fe), bakır (Cu), krom (Cr), kadmiyum (Cd), kurşun (Pb), çinko (Zn), civa (Hg), kobalt (Co), mangan (Mn), nikel (Ni), berilyum (Be), arsenik (As) ve selenyum (Se) elementlerinin sularda en yaygın bulunan metal elementler olduğunu göstermektedir [4], [7], [13], [14]. Belirtilen elementler arasında arsenik metalloid, selenyum ise metal olmayan element sınıfına girmektedir. Ancak, bu makale kapsamında genel olarak elementlerin ifade edilmesinde metal terimi kullanılmıştır. Bu elementlerden bazıları (Fe, Cu, Cr, Zn, Se, Mn, Ni), küçük derişimlerde, biyolojik süreçlerin ve fizyolojik fonksiyonların devamlılığı için gerekli elementlerdir. Ancak, bu elementler doğada birikebilir ve çok küçük derişimlerde bile sağlık problemlerine neden olabilir [2], [4], [7], [9], [14]-[19]. Metallerin atık sulardan giderilmesi için adsorpsiyon/biyosorpsiyon, biyoremediasyon kolagülasyon/flokülasyon, oksidasyon/çöktürme, membrane teknolojisi, elektrokimyasal işlemler, iyon değiştirme, fotokatalizleme vb. gibi farklı bir çok yöntem kullanılmaktadır [20]-[24]. Bu yöntemlerden adsorpsiyon, hem ucuz olması hem de uygulaması kolay ve yüksek verimli olmasından dolayı en çok tercih edilen yöntemler arasındadır [4], [6]-[7], [12], [16]-[18], [25]. Aktif karbon oldukça gözenekli bir yapıya sahiptir ve adsorpsiyon yönteminde sık kullanılan bir adsorbenttir. Ancak pahalı olması, araştırmacıları alternatif, ucuz ve doğal sorbent bulmaya yönlendirmiştir. Lignin-selüloz yapı içeren fıstık kabuğu, fındık kabuğu, ceviz kabuğu, pirinç kabuğu, pamuk sapı, mısır sapı vb. gibi bir çok

tarımsal atık, sulardan kirletici gideriminde kullanılabilecek doğal biyosorbentlerdir [11], [14]-[15], [18].

Bu makale kapsamında; Al, Fe, Pb, Cr, Cu, As ve Cd elementlerini içeren sulu ortamdan metallerin tarımsal bir atık olan fındık kabuğu (FK) kullanılarak gideriminde adsorpsiyon mekanizması incelenmiş ve adsorpsiyonun kinetik ve termodinamik açıdan modellenmesi yapılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Deneysel Sisteminin Matematiksel Tanımlanması (Mathematical Description of Experimental System)

Fındık kabuğunun birim kütlesi başına herhangi bir anda adsorplanan metal derişimi Eş. 1 kullanılarak hesaplanabilir:

$$q = \frac{C_0 - C_{kalan}}{X_0} = \frac{C_{ad}}{X_0} \quad (1)$$

C_{kalan} : Herhangi bir anda, adsorplanmadan kalan metal derişimi (mg/L)

C_0 : Başlangıç metal derişimi (mg L⁻¹)

X_0 : Fındık kabuğunun çözüldüdeki derişimi (g/L)

C_{ad} : Herhangi bir anda, adsorplanan metal derişimi (mg/L)'dir.

Denge durumunda, C_{kalan} C_{den} 'e, q ise q_{den} 'e eşittir ve Eş. 2 ile gösterilebilir.

$$q_{den} = \frac{C_0 - C_{den}}{X_0} \quad (2)$$

Giderilen metal miktarının yüzde olarak değeri ise, Eş. 3 kullanılarak hesaplanabilir:

$$\%R = \frac{C_0 - C_{kalan}}{C_0} * 100 \quad (3)$$

$\%R$: yüzde olarak metal giderim verimidir.

Adsorpsiyon hızı, birim adsorbent kütlesi tarafından adsorplanan metal miktarına (q) karşı zaman grafiğinden, $t=0$ anında çizilen teğetin eğimi olarak tanımlanmıştır (Eş. 4).

$$r_{ad} = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (4)$$

Burada,

r_{ad} : Adsorpsiyon hızı (mg/g.dk)

t : Zaman (dk)'dır.

2.2. Adsorpsiyon Kinetiğinin Modellenmesi (Modelling of Adsorption Kinetics)

Adsorpsiyon zamana bağlı bir süreçtir. Atık suların metallerin gideriminde, adsorpsiyon hızının bilinmesi hem tasarım ve hem de adsorbentin kullanılabilirliğinin araştırılması açısından önemlidir. Yığın sıvı ortamından sıvı filme ya da adsorbenti çevreleyen sınır tabakaya doğru metal iyonu hareketi ihmal edildiğinde, adsorpsiyon işleminde yer alacak basamaklar şunlardır:

- İyonların film tabakasından adsorbentin dış yüzeyine taşınımı (dış difüzyon)
- İyonların adsorbent yüzeyinden iç kısımdaki aktif merkezlere taşınımı (iç difüzyon)
- Adsorbent yüzeyindeki aktif merkezler tarafından iyonların tutulması. Bu son basamak denge reaksiyonu olarak düşünülür, hızlı olduğu kabul edilir ve ihmal edilir.

Toplam adsorpsiyon hızı en yavaş basamak tarafından kontrol edilir. Bunun yanı sıra, iki basamağın da adsorpsiyon hızını kontrol ettiği zamanlar olabilir.

Fındık kabuğu adsorbentinin adsorpsiyon kinetiğini incelemek için basitleştirilmiş üç farklı kinetik model uygulanmıştır.

- Pseudo-birinci derece kinetik
- Pseudo-ikinci derece kinetik
- Doygunluk tipi kinetik

Bu üç model de temel olarak tüm adsorpsiyon basamaklarını (dış difüzyon, iç difüzyon) içerdiğinden pseudo-modeller olarak ifade edilir.

2.2.1. Dış Difüzyon (External Diffusion)

Birinci durumda film difüzyon önemli bir hız kısıtlayıcı basamaktır. Adsorplanacak metal derişiminin zamanla değişimi ile dış kütle aktarım katsayısı, k_L , arasındaki ilişki Eş. 5.'te gösterilmiştir:

$$\frac{dC_{kalan}}{dt} = -k_L A (C_{kalan} - C_S) \quad (5)$$

Burada,

k_L : Dış kütle aktarım katsayısı (cm/dak)

C_S : Fındık kabuğu yüzeyinde adsorplanan metal derişimi (mg/L),

A : Kütle aktarımı için özgül yüzey alanı (cm^2/cm^3)'dır.

Adsorpsiyon işleminin başlangıç aşamasında genellikle iç direncin ihmal edildiği ve taşınımın daha çok film difüzyon mekanizmasıyla olduğu kabul edilir. Partikül içi difüzyonun ihmal edildiği $t = 0$ anında C_S ihmal edilebilir ve $C_{kalan} = C_0$ alınabilir. Bu durumda dış taraf kütle aktarımı adsorplanan bileşenin başlangıç adsorpsiyon hızı ile karakterize edilir. Yukarıda yapılan varsayımlardan sonra Eş. 5, Eş. 6'ya dönüşür.

$$\left[\frac{d(C_{kalan}/C_0)}{dt} \right]_{t \rightarrow 0} = -k_L A \quad (6)$$

k_L genel olarak partikül boyutu, hidrodinamik koşullar ve sistem fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonudur.

Özgül yüzey alanını belirlemek pek mümkün olmadığından, partikül dış yüzey alanı, düşük poroziteden dolayı yaklaşık özgül yüzey alanı olarak alınabilir. Partiküllerin küresel olduğu kabulüyle, özgül yüzey alanı Eş. 7'den bulunabilir.

$$A = \frac{6X_0}{d_p \rho} \quad (7)$$

Burada,

d_p : Partikül çapı (cm),

ρ : Partikül yoğunluğu (g/L) olarak tanımlanır.

C_{kalan}/C_0 'a karşı t grafiğine $t=0$ anında çizilen teğetlerin eğiminden başlangıç adsorpsiyon hızları ve bu değerlerden yararlanarak da kütle aktarım katsayıları bulunur. C_0 ile kütle aktarım katsayıları arasındaki ilişki doğrusal ise adsorpsiyonun tamamını dış taraf kütle aktarımı kontrol eder [26]-[27].

2.2.2. İç Difüzyon (Intraparticle Diffusion)

Weber-Morris [31] tarafından geliştirilen modele göre iç difüzyon hızı $t^{0.5}$ 'in bir fonksiyonudur ve Eş. 8 ile tanımlanır:

$$q = f \left(\frac{D_t}{r_p} \right)^{0.5} = K t^{0.5} \quad (8)$$

Burada,

D : Partikül içi etkin difüzyon katsayısı (cm^2/dak)

r_p : Partikül yarıçapı (cm)

K : İç difüzyon sabiti ($mg/g.dak^{0.5}$) olarak tanımlanır.

Bu modele göre, q 'nın $t^{0.5}$ ile değişimi doğrusal ise adsorpsiyon sürecinde iç difüzyon söz konusudur. Aksi durumda, iç difüzyon ile birlikte diğer mekanizmalar da kontrol basamağında yer alır. Eğer birden fazla lineer bölge mevcutsa; birinci bölge dış taraf kütle aktarım direncine işaret eder. İkinci bölge partikül içi difüzyonun hız kısıtlayan basamak olduğunu gösterir ve bu doğrunun eğimi iç difüzyon hız sabitinin hesaplanmasında kullanılabilir (Eş. 8). III. bölge ise adsorpsiyonun tamamının partikül içi difüzyon tarafından kontrol edilmediğini, başka mekanizmaların da adsorpsiyon hızının kontrolünde etkin olduğunu göstermektedir.

2.2.3. Pseudo-birinci-derece Kinetik Modeli (Pseudo-first-order Kinetic Model)

Adsorbent kapasitesini temel alan bu model Eş. 9'da verilmiştir:

$$\frac{dq}{dt} = k_{1,ad} (q_{den} - q) \quad (9)$$

Burada, $k_{1,ad}$ birinci derece adsorpsiyon hız sabiti (1/dak)dir. $t=0$ 'da $q=0$ ve $t=t$ 'de $q=q$ sınır koşulları uygulanarak Eş. 9.'un integrali alındığında Eş. 10. elde edilir.

$$\log(q_{den} - q) = \log q_{den} - \frac{k_{1,ad}}{2.303} t \quad (10)$$

Bu kinetik modelin uygulanabilirliği; $\log(q_{den} - q)$ 'ya karşı t grafiğinin bir doğru vermesiyle mümkündür. q_{den} ve $k_{1,ad}$ değerleri doğrunun eğimi ve y eksenini kesim noktasından hesaplanabilir. Ancak bu model, pek çok durumda toplam adsorpsiyon süresi için geçerli değildir, genellikle adsorpsiyon prosesinin ilk 20-30 dakikası için uygulanabilir. Ayrıca, doğru deneysel q_{den} değerlerinin tayini $t=\infty$ 'da mümkün olacağından birinci derece kinetik model birçok durumda iyi bir uyum göstermez [28].

2.2.4. Pseudo-ikinci-derece Kinetik Modeli (Pseudo-second-order Kinetic Model)

İkinci derece kinetik model de, adsorbent kapasitesini temel alan bir modeldir ve adsorpsiyon işleminin kimyasal adsorpsiyon mekanizmasını içerdiği kabul edilir. Diğer modelin aksine bu model, tüm adsorpsiyon süresince olan davranışı tahmin eder. İkinci derece model Eş. 11 ile gösterilir:

$$\frac{dq}{dt} = k_{2,ad} (q_{den} - q)^2 \quad (11)$$

Burada $k_{2,ad}$ ikinci derece adsorpsiyon sabitidir (g/mg.dak). $t=0$ 'da $q=0$ ve $t=t$ 'de $q=q$ sınır koşulları uygulanarak Eş. 11. integre edildiğinde Eş. 12. bulunur:

$$\frac{1}{q_{den} - q} = \frac{1}{q_{den}} + k_{2,ad} t \quad (12)$$

Eş. 12 yeniden düzenlenirse Eş. 13'te verilen doğrusallaştırılmış şekil elde edilir.

$$\frac{t}{q} = \frac{1}{k_{2,ad} q_{den}^2} + \frac{1}{q_{den}} t \quad (13)$$

t/q 'ya karşı t doğrusunun eğiminden ve y eksenini kesim noktasından q_{den} ve $k_{2,ad}$ değerleri hesaplanabilir [28].

2.2.5. Doygunluk Tipi Kinetik Model (Saturation Type Kinetic Model)

Başlangıç adsorpsiyon hızı ve adsorplanan bileşenin başlangıç derişimi arasındaki bağlantıdan türetilmiş doyunluk tipi kinetik model de adsorpsiyonu tanımlamak için kullanılabilir. Başlangıç adsorpsiyon hızı Eş. 4 kullanılarak hesaplanabilir. Deneysel verilere göre, düşük derişimlerde başlangıç adsorpsiyon hızı başlangıç metal derişiminin birinci derece fonksiyonudur. Yüksek derişimlerde ise, hız başlangıç metal derişiminden bağımsız olmaktadır. Eş. 14 her iki durum için de adsorpsiyon hızının tanımlanmasında kullanılabilir:

$$r_{ad} = \frac{kC_0}{1 + k_0 C_0} \quad (14)$$

Bu tür hız eşitliği "doygunluk tipi kinetik" olarak da tanımlanmaktadır. Burada, k (L/g.dak) ve k_0 (L/mg) doyunluk tipi hız sabitlerini tanımlar. Bu hız eşitliğinin doğrusallaştırılmış şekli Eş. 15 ile verilir.

$$\frac{1}{r_{ad}} = \frac{1}{k} \frac{1}{C_0} + \frac{k_0}{k} \quad (15)$$

$1/r_{ad}$ 'a karşı $1/C_0$ grafiğinin y eksenini kesim noktası k_0/k 'yı, eğimi ise $1/k$ 'yı verir. Bu model sabit sıcaklıkta çalışılan tüm derişim aralığında adsorpsiyon davranışını tahmin etmek için kullanılır [29].

2.3. Adsorpsiyon Aktivasyon Enerjisinin Bulunması (Determination of Adsorption Activation Energy)

Adsorpsiyonun sıcaklığa bağlı olduğu durumda, her sıcaklık için farklı hız sabitleri elde edilir. Bu hız sabitlerine bağlı olarak adsorpsiyon aktivasyon enerjisi ile ilgili bilgi elde etmek mümkündür. Adsorpsiyon temel olarak fiziksel ve kimsayal olarak iki sınıfa ayrılabilir. Fiziksel adsorpsiyon hızlı bir şekilde oluşur ve enerji gereksinimi küçük ($<4.2 \text{ kJ mol}^{-1}$) olduğu için tersinirdir. Kimyasal adsorpsiyon ise fiziksel adsorpsiyona göre daha güçlü bağlar içerir ve enerji gereksinimini daha yüksektir ($8.4 - 83.7 \text{ kJ mol}^{-1}$). Eş. 16'da verilen doğrusallaştırılmış Arrhenius eşitliğinden yararlanarak $\ln k$ 'ya karşı $1/T$ grafiğinin eğiminden aktivasyon enerjisi, y ekseninin kesim noktasından Arrhenius sabiti bulunabilir [30].

$$\ln k = -\frac{E_A}{R} \frac{1}{T} + \ln A_0 \quad (16)$$

Burada,

E_A : Aktivasyon enerjisi(J/mol)

A_0 : Arrhenius sabiti (L/g.dak)

R : İdeal gaz sabiti (J/mol.K)

T : Mutlak sıcaklık (K)'dir.

2.4. Fındık Kabuğunun Adsorbent Olarak Hazırlanması (Preparation of Hazelnut Shell as Adsorbent)

Çalışmada adsorbent olarak entegre fındık işleme tesisi atıklarından fındık kabuğu kullanılmıştır. Muhtemel toz ve kiri uzaklaştırmak için fındık kabuğu (FK), adsorpsiyon deneylerinde kullanılmadan önce çeşme suyu ile yıkanmış, daha sonra saf su ile yıkanarak 60°C fırında sabit tartıma gelene kadar kurutulmuştur. Fındık kabukları daha sonra laboratuvar tipi bir öğütücüde küçük parçalara ayrılmış ve $0.125 \text{ mm} < d \leq 1 \text{ mm}$ boyutuna sahip partiküller kapaklı cam bir kapta adsorpsiyon deneylerinde kullanılmak üzere muhafaza edilmiştir.

2.5. Adsorpsiyon Deneyleri (Adsorption Studies)

Bu çalışmada; Al, Fe, Pb, Cr, Cu, As ve Cd içeren sulu ortamdan metal elementlerin fındık kabuğu kullanılarak gideriminde ortam pH'ı, sıcaklık, başlangıç ağır metal derişimi ve biyosorbent miktarının etkileri kesikli karıştırılmalı kapta

incelenmiştir. Adsorpsiyon deneyleri kesikli düzende çalışan tepkime kaplarında gerçekleştirilmiştir. Tepkime kabı olarak kullanılan 100 mL hacmine sahip, 250 mL'lik erlenlerin ağızları, çözeltilerin buharlaşmasını önlemek amacıyla alüminyum folyo ile sıkı bir şekilde kapatılmış ve deneyler sabit karıştırma hızı ve sıcaklığın sağlandığı çalkalayıcıda yürütülmüştür. Uzaklaştırılmak istenen elementleri içeren çözeltilerin istenen derişimdeki çözeltileri 1000 mg L^{-1} 'lik stok çözeltiden (SCP Science, Canada) seyreltilerek hazırlanmıştır.

Adsorpsiyon deneylerinde, belli derişimlerde metal içeren, pH'ı ayarlanmış 100 mL'lik çözeltilere, biyosorbent derişimi 1.0 g L^{-1} olacak şekilde biyosorbent eklenmiştir. Metal derişimleri adsorpsiyon deneylerine başlamadan önce tayin edilmiştir. Biyosorbentlerin çözeltiye eklendiği an, $t=0$ anı olarak alınmıştır. 24 saat süren adsorpsiyon çalışmalarında karıştırma anından itibaren, belirli zaman aralıklarında örnekler alınarak, çözeltide adsorplanmadan kalan metal derişimlerinin analizi induktif eşleşmiş plazma-kütle spektrofotometresi (Bruker 820-MS ICP-MS) (CA, USA)) kullanılarak yapılmıştır. ICP-MS analizleri, Giresun Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında hizmet alımı ile gerçekleştirilmiştir.

Adsorpsiyon deneylerinde kullanılan biyosorbent yapı analizi elemental analiz cihazı (Costech ECS 4010 Elemental Analizleyici, USA) kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, biyosorbent yüzey alanı çok noktalı-N₂-BET yöntemi ile (cihaz: Autosorb iQ, Quantachrome, USA) ve pH ayarları ise seyreltik/derişik HNO₃ ve NaOH (Merck, Almanya) kullanılarak Hanna HI 9812-5 (Hanna, USA) pH-metre ile yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Fındık Kabuğunun Karakterizasyonu (Characterization of Hazelnut Shell)

Adsorpsiyon deneylerinde kullanılan fındık kabuğunun (FK) elemental analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. Fındık kabuğunun elementel özellikleri (The elementel properties of hazelnut shell)

Özgül yüzey alanı, BET (m ² /g)	0.676
Elementel analiz	
C (w%)	46.82
H (w%)	5.26
N (w%)	1.06
S (w%)	n.d.
*O (w%)	46.86
Kül içeriği (w%)	2.86

*Oksijen miktarı elemental analiz cihazı ile hesaplanamadığından değeri matematiksel hesaplama ile bulunmuştur. n.d. tayin edilememiştir.

3.2. Başlangıç pH'nın Etkisi (The Effect of Initial pH)

Fındık kabuğunun adsorbent olarak kullanıldığı kesikli karıştırmalı kap çalışmalarında, başlangıç pH'nın metal giderimine etkisi, 10 mg L⁻¹ başlangıç metal derişiminde, pH'nın 1.5-8 aralığında değiştirildiği ortamlarda 24 saat süre boyunca incelenmiş ve elde edilen %giderim değerleri (%R) Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. pH'nın metal giderimi üzerine etkisi (C₀: 10 mg L⁻¹, T: 22°C, X: 1.0 g L⁻¹, karıştırma hızı: 200 rpm) [The effect of pH on the removal of metal (C₀: 10 mg L⁻¹, T: 22°C, X: 1.0 g L⁻¹, agitation rate: 200 rpm)]

Element	%giderim (%R)					
	pH: 1.5	pH: 3	pH: 4	pH: 5	pH: 6	pH: 8
Al	13.31	15.68	56.55	90.74	88.52	89.38
Cr	3.45	16.86	52.49	94.71	93.73	94.76
Fe	28.42	43.05	70.63	89.31	70.93	64.80
Cu	23.18	37.04	68.72	95.66	65.21	71.61
As	3.92	53.19	81.56	96.42	87.33	86.95
Cd	12.18	10.05	20.65	55.38	76.39	94.61
Pb	9.78	56.85	89.86	88.66	96.48	95.74

Düşük pH değerlerinde sıvı ortamda yoğun olarak bulunan hidrojen iyonları adsorbent yüzeyine bağlanmak için pozitif yüklü metal iyonları ile bir yarış içerisinde. Ortamdaki hidrojen iyonları adsorbent yüzeyini protonlayarak adsorbent yüzeyinin pozitif yüklü olmasına ve düşük adsorpsiyona neden olur. Yüksek pH değerlerinde, hem ortamdaki hidrojen iyonları hidroksil iyonları ile nötralize edilecek hem de adsorbent yüzeyindeki fonksiyonel gruplar iyonlaşacaktır. Fındık kabuğundaki karboksil gruplar iyonlaşarak yüzeyde negative yük oluşturacak ve pozitif metal

iyonların aktif gruplara bağlanmasını sağlayacaktır [9]. Adsorpsiyon ortamında yer alan çoğu element için en yüksek giderim verimi pH 5.0 civarında gözlenmiştir. pH 6.0'dan daha yukarıdaki pH değerlerindeki çözeltilerde çökme gözlenmiştir. Bu nedenle optimum pH değeri 5.0 olarak seçilmiş ve diğer tüm deneyler bu pH değerinde gerçekleştirilmiştir.

3.3. Sıcaklığın Etkisi (The Effect of Temperature)

Sıcaklığın dengede birim adsorbent ağırlığı başına adsorplanan metal miktarına etkisi, pH 5.0'da, 10 mg L⁻¹ başlangıç metal derişimlerinde, sıcaklığın 15-35°C aralığında değiştirildiği ortamlarda 24 saat süre boyunca incelenmiş ve elde edilen % giderim değerleri Tablo 3'te verilmiştir. %giderim değerleri sıcaklık ile değişim göstermekle birlikte genel olarak en yüksek giderim değerleri 22°C sıcaklık değerinde elde edilmiştir. Bu nedenle, diğer çalışmalar bu sıcaklık değerinde yürütülmüştür.

Tablo 3. Farklı sıcaklıklar için elde edilen %giderim değerleri (pH:5.0, C₀: 10 mg L⁻¹, X: 1.0 g L⁻¹, karıştırma hızı: 200 rpm) [%removal values obtained at different temperatures (pH:5.0, C₀: 10 mg L⁻¹, X: 1.0 g L⁻¹, agitation rate: 200 rpm)]

Element	%giderim (%R)		
	15°C	22°C	35°C
Al	47.22	90.74	89.53
Cr	42.78	94.71	85.52
Fe	37.60	89.31	81.74
Cu	57.33	95.66	83.07
As	31.75	96.42	82.70
Cd	15.15	55.38	31.00
Pb	68.28	88.66	91.69

3.4. Başlangıç Metal Derişiminin Etkisi (The Effect of Initial Concentration of Metal)

Yüksek başlangıç metal derişimi, sıvı ile katı faz arasında oluşabilecek kütle aktarım direncinin aşılmasında önemli bir itici güç görev görür. Başlangıç metal derişiminin etkisi 0.5-20 mg L⁻¹ aralığında değişen derişimlerde, 22°C sıcaklıkta, 5.0 başlangıç pH'ında 24 saat süre boyunca incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'de verilmiştir. Özellikle kadmiyum hariç başlangıç derişimi 10 mg L⁻¹'e kadar arttıkça giderim değeri genel olarak artış eğilimi göstermiştir. Derişim arttıkça sulu çözeltilerdeki metal iyon sayısı artacak

ve adsorbent yüzeyindeki mevcut aktif merkezlere bağlanmak isteyen iyonlar arasında bir yarış olacaktır. Bu durum, bazı iyonların (Cd gibi) adsorpsiyonun azalmasının bir nedeni olarak açıklanabilir.

Tablo 4. Başlangıç metal derişiminin giderim üzerine etkisi (pH:5.0, T: 22°C, X: 1.0 g L⁻¹, karıştırma hızı: 200 rpm) [The effect of initial metal concentration on the removal (pH:5.0, T: 22 °C, X: 1.0 g L⁻¹, agitation rate: 200 rpm)]

Element	%giderim (%R)			
	0.5 mg L ⁻¹	5 mg L ⁻¹	10 mg L ⁻¹	20 mg L ⁻¹
Al	84.54	92.86	90.74	46.10
Cr	90.04	93.19	94.71	42.65
Fe	84.00	86.29	89.31	39.50
Cu	89.26	96.80	95.66	69.32
As	73.26	87.86	96.42	41.92
Cd	78.65	79.74	55.29	22.21
Pb	94.47	90.57	88.66	66.17

3.5. Adsorbent Miktarının Etkisi (The Effect of Adsorbent Amount)

Adsorbent miktarının etkisi pH 5.0 değeri ve 22°C sıcaklıkta, adsorbent miktarının 1 g L⁻¹ ila 20 g L⁻¹ aralığında değiştiği ortamlarda 10 mg L⁻¹ başlangıç metal derişimi için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir. Adsorbent miktarının 10 g L⁻¹'e kadar artması ile giderimin arttığı, daha ileri bir artışın giderimi önemli ölçüde etkilemediği görülmüştür.

Tablo 5. Adsorbent miktarının metal giderim üzerine etkisi (pH:5.0, T: 22°C, C₀: 10 mg L⁻¹, karıştırma hızı: 200 rpm) [The effect of adsorbent amount on the removal of metal (pH:5.0, T: 22°C, C₀: 10 mg L⁻¹, agitation rate: 200 rpm)]

Element	%giderim (%R)		
	1 g L ⁻¹	10 g L ⁻¹	20 g L ⁻¹
Al	70.38	91.12	79.33
Cr	68.96	93.04	85.10
Fe	52.36	89.94	89.79
Cu	87.04	90.71	88.96
As	70.55	89.33	88.15
Cd	39.64	85.26	90.21
Pb	87.74	97.26	98.12

3.6. Adsorpsiyon Kinetiğinin Modellenmesi ve Kinetik Sabitlerin Bulunması (Modelling of Adsorption Kinetics and Determination of Kinetic Constants)

Dış taraf kütle aktarım katsayısının (k_L) ve iç difüzyon hız sabitinin (K) değişimi başlangıç metal derişiminin bir fonksiyonu olarak pH 5.0'de, 22°C sıcaklıkta incelenmiştir. k_L değerleri C_{kalan}/C₀ değerlerine karşı çizilen t grafiklerinin t=0 anındaki eğim değerlerinden hesaplanmıştır. K değerleri ise q değerlerine karşı çizilen t^{0.5} grafiklerinden, q'nun t^{0.5} ile değişiminin doğrusal olduğu bölgedeki eğimlerden bulunmuştur. Elde edilen k_L ve K değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

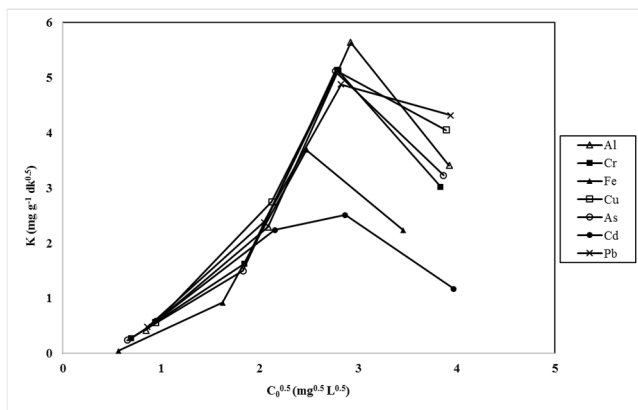
Tablo 6. Dış taraf kütle aktarım katsayıları (k_L) ve iç difüzyon hız sabitleri (K) [External mass transfer coefficients (k_L) and intraparticle diffusion rate constants (K)]

Element	C ₀ (mg/L)	k _L (cm/dak)	K (mg/g.dak ^{0.5})
Al	0.71	2.57	0.42
	4.35	2.28	2.29
	8.54	2.86	5.64
	15.4	0.96	3.41
Cr	0.48	2.50	0.27
	3.41	2.07	1.63
	7.77	2.87	5.14
	14.72	0.89	3.02
Fe	0.32	0.72	0.05
	2.63	1.52	0.92
	6.13	2.61	3.69
	11.94	0.81	2.24
Cu	0.89	2.72	0.56
	4.51	2.64	2.75
	7.80	2.85	5.12
	15.16	1.16	4.05
As	0.43	2.42	0.24
	3.35	1.94	1.50
	7.66	2.90	5.12
	14.95	0.94	3.23
Cd	0.89	2.87	0.59
	4.64	2.09	2.24
	8.23	1.32	2.51
	15.76	0.32	1.17
Pb	0.74	2.84	0.48
	4.17	2.48	2.38
	7.99	2.65	4.88
	15.51	1.21	4.32

Weber and Morris [31] dış difüzyon ile kontrol edilen bir adsorpsiyon sisteminde başlangıç hızlarının çözelti derişimi ile doğrudan orantılı olduğunu belirtmiştir. Tablo 6'da dış difüzyon için elde edilen verilere bakıldığında başlangıç derişimi ile hız değerleri arasında düzgün bir

orantıdan bahsetmek pek mümkün görünmemektedir. Bu nedenle, dış difüzyon, en azından tek başına, hız kısıtlayıcı basamak olarak nitelendirilemez.

İç difüzyon hız sabitleri başlangıç metal derişiminin 10 mg L^{-1} 'e artması ile artmıştır. Bu durum, başlangıç metal derişiminin artması ile oluşan yüksek sürücü gücün etkisi olarak açıklanabilir. İç difüzyon hız sabiti ile başlangıç metal derişiminin karekök değerlerinin doğrusal değişimi iç difüzyonun tek başına hız kısıtlayıcı basamak olduğunu gösterir (Şekil 1). Şekil 1'e göre, iç difüzyon tek başına hız kısıtlayıcı basamak değildir. Metallerin fındık kabuğuna adsorpsiyonu sürecinde hem dış hem de iç difüzyon, kontrol basamağı olarak yer almaktadır.



Şekil 1. İç difüzyon hız sabitinin (K) başlangıç metal derişiminin karekökü ($C_0^{0.5}$) ile değişimi [The change of intraparticle diffusion rate constants (K) with the square root of initial metal concentration ($C_0^{0.5}$)]

Adsorpsiyonun birinci derece kinetik modele uygunluğunu araştırmak üzere farklı başlangıç metal derişimlerinde $\log(q_{den}-q)$ 'ya karşı çizilen t grafiklerinden birinci derece hız sabitleri ($k_{1,ad}$) ve q_{den} değerleri bulunmuştur. İkinci derece kinetik modele uygunluğunun araştırılması için t/q 'ya karşı çizilen t grafiklerinden ikinci derece hız sabitleri ($k_{2,ad}$) ve q_{den} değerleri belirlenmiştir. Elde edilen birinci ve ikinci derece hız sabitleri Tablo 7'de verilmiştir. Her iki kinetik model için de elde edilen hız sabitlerinin artan başlangıç metal derişimi ile azaldığı görülmüştür. Ayrıca, her iki model için elde edilen korelasyon katsayılarına bakıldığında, pseudo-ikinci-derece kinetik modelin daha iyi uyum sağladığı görülmektedir.

Son olarak adsorpsiyonun doymunluk tipi kinetik modele uygunluğunu araştırmak üzere $1/r_{ad}$ 'a karşı çizilen $1/C_0$ grafiklerinden k ve k_0 hız sabitleri

bulunmuştur. Elde edilen tüm veriler Tablo 8'de sunulmuştur. Elde edilen korelasyon katsayıları yüksek olmasına rağmen pseudo-ikinci-derece kinetik model ile kıyaslandığında daha düşük değere sahiptir.

3.7. Adsorpsiyon Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması (Calculation of Adsorption Activation Energy)

Doymunluk tipi adsorpsiyon kinetik modelinden farklı sıcaklıklarda elde edilen $\ln k$ değerleri $1/T$ 'ye karşı grafiğe alınarak grafiğin eğiminden adsorpsiyon aktivasyon enerjisi hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Tablo 8'de doymunluk tipi kinetik hız sabitleri ile birlikte verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde, metallerin fındık yüzeyine bağlanmasında fiziksel ($\text{Cr, Cu, Pb} < 4 \text{ kJ mol}^{-1}$) ve kimyasal adsorpsiyon ($\text{Al, Fe, As, Cd} > 8 \text{ kJ mol}^{-1}$) etkindir.

Tablo 7. Birinci (k_1) ve ikinci (k_2) derece kinetik model hız sabitleri [First (k_1) and second (k_2) order kinetic model rate constants]

Element	C_0 (mg L^{-1})	k_1 (1 dak^{-1})	R^2	k_2 (1 dak^{-1})	R^2
Al	0.71	0.144	0.781	4.329	1.000
	4.35	0.049	0.987	0.283	1.000
	8.54	0.048	0.486	0.223	1.000
	15.4	0.045	0.838	0.055	1.000
Cr	0.48	0.077	0.601	1.398	1.000
	3.41	0.049	0.841	0.301	1.000
	7.77	0.046	0.494	0.289	1.000
	14.72	0.044	0.995	0.025	0.999
Fe	0.32	0.022	0.997	1.059	0.999
	2.63	0.061	0.899	0.228	0.999
	6.13	0.057	0.185	0.209	1.000
	11.94	0.055	0.977	0.147	1.000
Cu	0.89	0.223	0.860	3.024	1.000
	4.51	0.098	0.707	0.179	1.000
	7.80	0.066	0.190	0.177	0.998
	15.16	0.048	0.826	0.046	0.999
As	0.43	0.005	0.890	3.478	0.996
	3.35	0.100	0.932	0.185	1.000
	7.66	0.164	0.449	0.129	1.000
	14.95	0.094	0.716	0.096	1.000
Cd	0.89	0.012	0.632	1.813	1.000
	4.64	0.156	0.708	0.326	1.000
	8.23	0.066	0.386	0.264	1.000
	15.76	0.016	0.892	0.062	0.999
Pb	0.74	0.017	0.124	3.053	0.999
	4.17	0.093	0.686	0.358	1.000
	7.99	0.070	0.183	0.214	0.999
	15.51	0.055	0.827	0.082	1.000

Tablo 8. Doymunluk tipi kinetik model hız sabitleri ve aktivasyon enerjisi değerleri (Saturation type kinetic model rate constants and the values of activation energy)

Element	k (L/g.dak)	k ₀ (L/mg)	R ²	E _A (kJ mol ⁻¹)
Al	0.0285	0.0116	0.997	8.06
Cr	0.0304	0.0230	0.998	1.76
Fe	0.0283	0.0288	0.999	12.4
Cu	0.0382	0.0365	0.985	1.68
As	0.0384	0.0786	0.864	11.34
Cd	0.0287	0.0931	0.981	42.99
Pb	0.0319	0.0179	1.000	3.68

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmanın amacı; Al, Fe, Pb, Cr, Cu, As ve Cd içeren sulu ortamdan metallerin entegre fındık işleme tesisi atığı olan fındık kabuğu kullanılarak gideriminde ortam pH'ı, sıcaklık, başlangıç metal derişimi ve adsorbent miktarının etkilerinin kesikli karıştırmalı kaptan incelenmesi ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak adsorpsiyon mekanizmasının incelenmesi ve adsorpsiyon sistemin kinetik modellenmesinin yapılmasıdır.

Adsorpsiyon çalışmasında optimum çalışma pH değeri 5.0 olarak bulunmuştur. Sıcaklığın metal giderimi üzerine etkisi incelendiğinde ise, optimum çalışma sıcaklığı 22°C olarak bulunmuştur. pH 5.0 değerinde ve 22°C sıcaklık değerinde, başlangıç metal derişiminin genel olarak 10 mg L⁻¹'e kadar arttıkça giderimin arttığı, başlangıç adsorbent derişiminin ise 10 g L⁻¹'e kadar arttıkça giderimin arttığı görülmüştür.

Adsorpsiyon mekanizmasının incelenmesi amacıyla Weber ve Morris [19] tarafından geliştirilen dış ve iç difüzyon modelleri kullanılarak dış taraf kütle aktarım katsayıları ve iç difüzyon hız sabitleri bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar, adsorpsiyon sürecinde dış taraf kütle aktarımı ve iç difüzyonun birlikte kontrol mekanizmasında yer aldığını göstermiştir. Pseudo-birinci-derece pseudo-ikinci-derece ve doymunluk tipi kinetik modeller fındık kabuğuna metal adsorpsiyon kinetiğinin incelenmesi için uygulanmış ve elde edilen veriler en iyi pseudo-ikinci-derece kinetik modele uyum sağlamıştır. Ayrıca elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerine göre, metallerin fındık kabuğuna adsorpsiyonunun fiziksel+kimyasal karakterli olduğu söylenebilir.

Adsorpsiyon yönteminin atıksulardan metal giderimine uygulanabilirliği diğer yöntemlerle kıyaslandığında biyolojik çevreye uygun, yeni kirlilikler üretmeyen, etkin, ekonomik ve uygulaması kolay bir yöntem olarak önerilebilir. Fındık işleme tesisi atıklarından fındık kabuğunun adsorbent olarak atıksularda bulunan birden fazla metalin aynı anda gideriminde kullanılabileceğini gösteren bu çalışma, ayrıca bu tür biyokütle atıkların değerlendirilmesi açısından önemlidir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)



Bu çalışma Giresun University Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından [proje no:394 FEN-BAP-A-200515-89, 2015] desteklenmiştir. Bu çalışma, International Symposium "The Environment and the Industry" 2017 sempozyumunda (28-29 Eylül 2017) Bükreş, Romanya'da sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Ahmedna et al., "The use of nutshell carbons in drinking water filters for removal of trace metals," *Water Res.*, vol. 38, pp. 1062-1068, Feb. 2004.
- [2] S. Chowdhury et al., "Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries," *Sci. Total Environ.*, vol. 569-570, pp. 476-488, Nov. 2016.
- [3] M. Dündar et al., "Çeşitli endüstriyel atık sularda ağır metal düzeylerinin belirlenmesi," *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 16, pp. 6-12, Nisan, 2012.
- [4] R. K. Gautam et al., "Biomass-derived biosorbents for metal ions sequestration: Adsorbent modification and activation methods and adsorbent regeneration," *J. of Environmental Chemical Eng.*, vol. 2, pp. 239-259, Mar. 2014.
- [5] O. Gok and O. Ç. Mesuyoğlu, "Olive pomace as a low-cost adsorbent for the removal heavy metals," *J. of the Faculty of Eng. and Architecture of Gazi University*, vol. 32, pp. 507-516, Haziran, 2017.
- [6] K. Kadirvelu et al., "Removal of heavy metals from industrial wastewaters by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste," *Bioresour Technol.*, vol. 76, pp. 63-65, Jan. 2001.

- [7] A. Karadag, "The removal of some metal ions from industrial wastewaters by biosorbent," Master dissertation, Chemistry Department, Balikesir University, Balikesir, 2008.
- [8] C. Özer et al. "Zn(II) iyonlarının piromellitik dianhidrit ile modifiye edilmiş poliamin poliüre polimeri ile adsorpsiyonu," *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 20, pp. 635-644, Ekim, 2016.
- [9] A. Sencan et al., "Determination of lead(II) sorption capacity of hazelnut shell and activated carbon obtained from hazelnut shell activated with ZnCl₂", *Environ Sci. Pollut Res Int*, vol. 22, pp. 3238-3248, Mar. 2015.
- [10] P. B. Tchounwou et al., "Heavy metal toxicity and the environment," *EXS*, vol. 101, pp. 133-164, April, 2012.
- [11] R. Wolfová et al., "Removal of lead from aqueous solution by walnut shell," *J. of Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, vol. 5, pp. 159-167, June, 2013.
- [12] L. Zhang, Y. Zeng and Z. Cheng, "Removal of heavy metal ions using chitosan and modified chitosan: A review," *J. of Molecular Liquids*, vol. 214, pp. 175-191, Feb. 2016.
- [13] D. Bingöl et al., "Artificial neural network (ANN) approach to copper biosorption process," *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 20, pp. 433-440, Dec. 2016.
- [14] W. S. Wan Ngah and M. A. Hanafiah, "Removal of heavy metal ions from wastewater by chemically modified plant wastes as adsorbents: a review", *Bioresour Technol*, vol. 99, pp. 3935-3948, August, 2008.
- [15] R. M. Ali et al., "Potential of using green adsorbent of heavy metal removal from aqueous solutions: Adsorption kinetics, isotherm, thermodynamic, mechanism and economic analysis," *Ecological Eng.*, vol. 91, pp. 317-332, June, 2016.
- [16] O. S. Amuda et al., "Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon," *Biochemical Eng. J.*, vol. 36, pp. 174-181, Sep. 2007.
- [17] D. A. Aremu et al., "Heavy metal analysis of groundwater from Warri, Nigeria", *Int. J. of Environmental Health Research*, vol. 12, pp. 261-267, 2002.
- [18] B. Koubaissy et al., "Valorization of agricultural waste into activated carbons and its adsorption characteristics for heavy metals," *Open Eng.*, vol. 4, no. 1. pp. 90-99, Mar. 2014.
- [19] J. Wang and C. Chen, "Biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae*: a review," *Biotechnol Adv*, vol. 24, pp. 427-451, Sep. 2006.
- [20] M. A. Barakat, "New trends in removing heavy metals from industrial wastewater," *Arabian J. of Chemistry*, vol. 4, pp. 361-377, Oct. 2011.
- [21] E.E. Bestawy et al., "Bioremediation of heavy metal-contaminated effluent using optimized activated sludge bacteria," *Applied Water Sci.*, vol. 3, pp. 181-192, Mar. 2013.
- [22] C. Blöcher et al., "Hybrid flotation - membrane filtration process for the removal of heavy metal ions from wastewater," *Water Res.*, vol. 37, pp. 4018-4026, Sep. 2003.
- [23] S.K. Gunatilake, "Methods of removing heavy metals from industrial wastewater," *J. of Multidisciplinary Eng. Sci. Stud. (JMESS)*, vol. 1, pp. 12-18, Nov. 2015.
- [24] E. Wahyuni et al., "Removal of toxic metal ions in water by photocatalytic method", *American Chemical Sci. J.*, vol. 5, pp. 194-201, Jan. 2015.
- [25] J. C. P. Vagheti et al., "Pecan nutshell as biosorbent to remove toxic metals from aqueous solution," *Separation Sci. and Technology*, vol. 44, pp. 615-644, Feb. 2009.
- [26] E. Kabasakal, "Herbisitlerden 2,4-diklorofenoksiasetik asit (2,4-D)'nin adsorpsiyonunun incelenmesi," Yüksek Lisans tezi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniv., Ankara, 2001.
- [27] N. Mameri et al., "Batch Zinc Biosorption by a Bacterial Non-living *Streptomyces rimosus* Biomass," *Water Res.*, vol. 33, pp. 1347-1354, Apr. 1999.
- [28] Z. Aksu and S. Tezer, "Equilibrium and kinetic modelling of biosorption of remazol black B by *Rhizopus arrhizus* in a batch system: Effect of temperature," *Process Biochemistry*, vol. 36, pp. 431-439, Dec. 2000.
- [29] Z. Aksu, "Atıksulardaki ağır metal iyonlarının yeşil alglerden *Chlorella vulgaris*'e adsorpsiyonunun kesikli düzende karıştırılmalı ve akışkan yatak tepkime

- kaplarında incelenmesi," Ph.D. Tezi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniv., Ankara, 1988.
- [30] Z. Aksu, "Equilibrium and kinetic modeling of cadmium (II) biosorption by *C. vulgaris* in a batch system: Effect of temperature," *Separation and Purification Biotechnology*, vol. 21, pp. 285-294, Jan. 2001.
- [31] W.J. Weber and J. C. Morris, "Kinetics of adsorption on carbon from solution," *J. Sanit. Eng. Div. ASCE*, vol. 89, pp. 31-60, 1963.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 05-06-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.319030	
	<u>Kabul/Accepted</u> 02-11-2017	<u>Online Access</u>	

Mikro Ark oksidasyon işlemi ile kaplanan Ti6Al4V alaşımının yüzey karakterizasyonu ve korozyon özelliklerinin incelenmesi

Aysun Ayday*¹

ÖZ

Titanyum ve alaşımları üstün mekanik özelliklerinden dolayı birçok sektörde tercih edilmekte olup, son yıllarda medikal uygulamalarda daha sık karşımıza çıkmaktadır. Bu çalışmada, kaplama öncesinde yüzeyleri zımparalanmış, parlatılmış Ti6Al4V alaşımları kullanılmıştır. Sabit kaplama çözeltisi ile farklı sürelerde kaplanmış numunelerin, oksit tabakasının kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü değerleri araştırılmıştır. Kaplanan numuneler, NaOH çözeltisi içinde korozyon testine maruz bırakılmıştır. Kaplanan yüzeylere taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analizi yapılmıştır. Artan süre ile kaplama tabakası kalınlığının ve yüzey pürüzlülüğünün arttığı tespit edilmiştir. Sonuçlar üretilen numunelerin korozyon dayanımında artış olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Mikro ark oksidasyon, Ti6Al4V, korozyon

Surface characterization and corrosion properties of coated Ti6Al4V alloy by micro arc oxidation

ABSTRACT

Titanium and its alloys are materials most commonly used for several sector especially medical application owing to some of their mechanical properties. In this study, Ti6Al4V were used as coating substrates. The influence of the different coating time was detailed (coating thickness, roughness) in this article. Coated samples were immersed to a corrosion resistance in NaOH solution. The MAO coatings were characterized by scanning electron microscope (SEM) and EDS analysis. The result indicate that with increasing the coating time increase the thickness and surface roughness. The results have indicated that the samples have good corrosion properties.

Keywords: Micro arc oxidation, Ti6Al4V, corrosion

¹ Sakarya University, Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya, Turkey. aayday@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Titanyum (Ti) ve alaşımları üstün mekanik özellikleri ile askeri ve sivil havacılık, otomotiv alanında ve medikal uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Yüksek sıcaklık dayanımı, yüksek korozyon direnci ve düşük yoğunluğa sebep olması sebebi ile en çok tercih edilen malzemeler sınıfına girmektedir [1-3]. Titanyum ve alaşımlarını son yıllarda daha çok biyomedikal uygulamalarda tercih edildiğini görmekteyiz [2,4]. Sebebi ise malzeme yüzeyinde oda sıcaklığında bile yüzeyinde kendiliğinden oluşan inerte titanyum dioksit tabakasıdır [3-6]. Yüzeyde oluşan bu kaplama tabakasının morfolojisi, kompozisyonu bu alaşımlarının biyo uyumluluk özelliğini doğrudan etkilemektedir [2,3]. Sol jel, plazma sprey, kimyasal buhar biriktirme yöntemleri bu alaşımlar üzerinde titanyum dioksit tabakasını oluşturmak için tercih edilen yöntemler arasında sayılabilir. Mikro ark oksidasyon (MAO) yöntemi ise düşük maliyeti, yüksek yapışma mukavemeti ve en önemlisi çevre dostu olması sebebi ile diğer yöntemlerini yerini almaya başlamıştır [1,3]. Bu çalışmada farklı sürelerde mikro ark oksidasyon yöntemi ile kaplanmış Ti6Al4V alaşımlarının yüzey özellikleri incelenmiştir. Mikro ark oksidasyon işlemi ile kaplanmış numunelerin yüzey özellikleri tarama elektron mikroskopu ve EDS analizleri ile incelenmiş, yüzey pürüzlülüğü, tabaka kalınlığı ölçümleri ve korozyon testi gerçekleştirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1 Altlık Malzemelerin Hazırlanması (Preparation of Substrate Materials)

Bu çalışmada Ti6Al4V alaşımı kullanılmıştır. Ti6Al4V alaşımının kimyasal bileşimi (wt%) 6.3 %Al, 4.2 %V, 0.15 %O, 0.11 %Fe, 0.03 %C, 0.02 %N, 0.001 %H ve kalan Ti olarak belirlenmiştir. Numuneler 6 mm çapında 70 mm ölçü boyu uzunluğunda kesilerek hazırlanmıştır. Yüzeyleri SiC zımpara ile zımparalandıktan sonra ultrasonik banyoda etil alkol ile yıkanarak hazır hale getirilmiştir.

2.2 Mikro Ark Oksidasyon (Micro Arc Oxidation-MAO)

Mikro ark işlemi için 10 kW kapasiteli güç kaynağına sahip cihaz kullanılmıştır. Hazırlanan altlık numuneler Na_2SiO_3 - $(\text{NaPO}_3)_6$ çözeltisi ile sırası ile 3-5-10 dakika sürelerinde DC akım ile kaplanmıştır. Elektrolitik çözelti bileşimi sabit

olup $10\text{g/lit Na}_2\text{SiO}_3$ ve $6\text{g/lit } (\text{NaPO}_3)_6$ 10 litrelik bir tank içinde hazırlanmıştır. Kaplama süresince çözelti sıcaklığı bir soğutma kabini yardımı ile 35°C 'de sabit tutulmuştur. Her numune için yeni çözelti hazırlanıp kaplama işlemi yapılmıştır. Mikro ark oksidasyon işlemi parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Hazırlanan kaplamaların yüzey pürüzlülükleri Mahr, Perthometer M1 cihazı ile ölçülmüştür. Ölçümler her numuneden 3 değer alınarak ortalama değerleri belirlenmiştir. Numunelerden farklı bölgelerden üçer ölçüm alınıp ortalama değerleri verilmiştir. Kaplama yüzey görüntüsü ve elementel analizleri ile kaplama kalınlıkları SEM (Joel, JSM 6060-LU), EDS analizleri ile incelenmiştir. Kaplama öncesi ve sonrası numunelerin yüzey pürüzlülükleri (Ra) Mahr, Perthometer M1 cihazı ile ölçülmüştür.

Tablo 1. MAO parametreleri (MAO parameters)

Numune Kodları	Elektrolitik Çözelti	Çözelti PH	Süre (dk)	Final Voltaj (V)
Ti-3	Na_2SiO_3 - $(\text{NaPO}_3)_6$	11.5	3	387
Ti-5	Na_2SiO_3 - $(\text{NaPO}_3)_6$	11.5	5	392
Ti-10	Na_2SiO_3 - $(\text{NaPO}_3)_6$	11.5	10	397

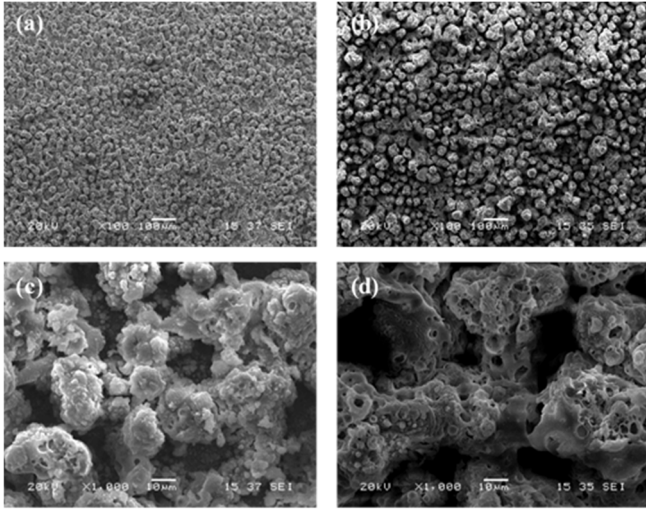
2.3 Korozyon Testi (Corrosion Test)

MAO ile kaplanan numuneler % 2 g/l lik NaOH çözeltisi içinde daldırmak suretiyle ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Çözelti sıcaklığı 28°C 'de sabit tutulup her gün çözelti değişim yapılmıştır.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS)

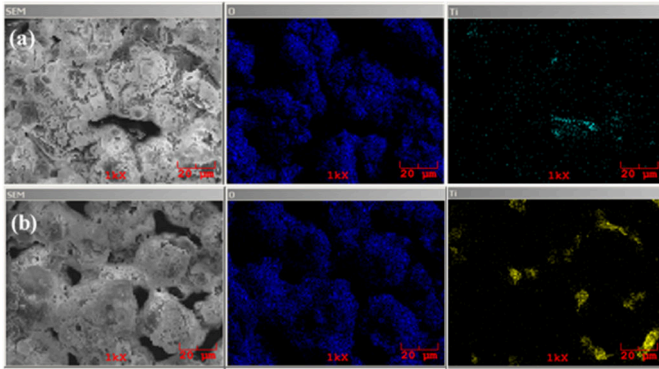
3.1 Yüzey Karakterizasyonu (Surface Characterization)

Şekil 1'de mikro ark oksidasyon ile minimum süre (3dk.) ve maksimum süre (10dk.) ile kaplanan numunelerin, sırası ile Şekil 1(a,c)'de Ti-3 ve Şekil 1(b,d)'de Ti-10 kodlu numunelerin yüksek ve düşük büyütmelelerdeki SEM görüntüleri verilmiştir. Şekilden, numune yüzeylerinin poroziteli morfolojide olduğu ve artan süre ile beraber yüzeyin pürüzlülüğünün ve por çaplarının arttığı görülmektedir. Medikal uygulamalarda poroziteli yüzeyler implant ve doku arasında bağlanma kabiliyetini arttırması sebebi ile daha çok tercih edilmektedir [6,7].



Şekil.1 (a) Ti-3 kodlu numunenin düşük büyütmedeki SEM görüntüsü (b) Ti-10 kodlu numunenin düşük büyütmedeki SEM görüntüsü (c) Ti-3 kodlu numunenin yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü (d) Ti-10 kodlu numunenin yüksek büyütmedeki SEM görüntüsü

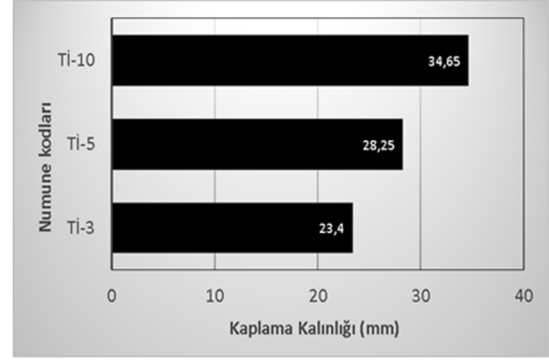
Şekil 2(a) ve Şekil 2 (b)'de minimum süre ile kaplanmış Ti-3 ve maksimum süre ile kaplanmış Ti-10 numunelerinin SEM görüntüsü ve EDS harita analizleri görülmektedir. Yapılan EDS harita analizleri sonuçlarına bakıldığında artan süreyle paralel yüzeyde titanyum ve oksijen elementlerinin dağılımında artış görülmüştür. Bu durum kaplama yüzeyinde TiO₂ tabakasının oluşma ihtimalini kuvvetlendirmiştir.



Şekil 2. (a) Ti-3 kodlu numunenin SEM görüntüsü ve EDS harita analizi (b) Ti-10 kodlu numunenin SEM görüntüsü ve EDS harita analizi

Farklı kaplama sürelerinde uygulanan MAO numunelerin oksit tabaka kalınlıkları Şekil 3'de verilmiştir. Şekil 3'den görüldüğü gibi, artan kaplama süresine bağlı olarak Ti-3 nolu numunenin kaplama tabakası kalınlığı 23,4 µm, Ti- 5 nolu numune için 28,25 µm, Ti-10 nolu numune için ise 34,65 mm değerine ulaşmaktadır. Yapılan çalışmalarda kaplanan oksit tabakasının

kimyasal bileşimi ve pürüzlülük değeri implant ve kemik arasındaki etkileşimde önemli bir rol aldığı gösterilmiştir [6,8].



Şekil 3. Üretilen numunelerin kaplama kalınlıkları

Ancak kaplama tabakası kalınlığının implant ve kemik etkileşiminde çok önemli bir yeri olmadığı düşünülmektedir. Fakat artan süre ile daha kalın kaplama tabakası elde edilse de amaç kalınlığı arttırmaktan çok daha yoğun ve sürekli bir tabaka üretimi sağlamaktır. Şekil 1'de gösterildiği üzere Ti-10 nolu numune yüzeyinin daha pürüzlü bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Tablo 2'de MAO işlemi ile kaplanmış Ti6Al4V altlık malzemelerin sırasıyla yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri verilmektedir. Parlatılmış Ti6Al4V altlık malzemesine ait yüzey pürüzlülüğü değeri 2.86 µm, artan süre ile yüzey pürüzlülüğü değeri 3.53 µm, 3.75 µm ve 3.98 µm olarak ölçülmüştür. MAO işlem süresinin artması ile yüzey pürüzlülük değerlerinde artış görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğündeki bu artış implant malzemelerin uyumluluğu açısından istenen bir durumdur [6]. Kaplama süresinin artışı ile yüzey pürüzlülüğündeki artış, kaplama süresinin artmasıyla deşarj kanallarının çapının lineer artmasına bağlanabilir.

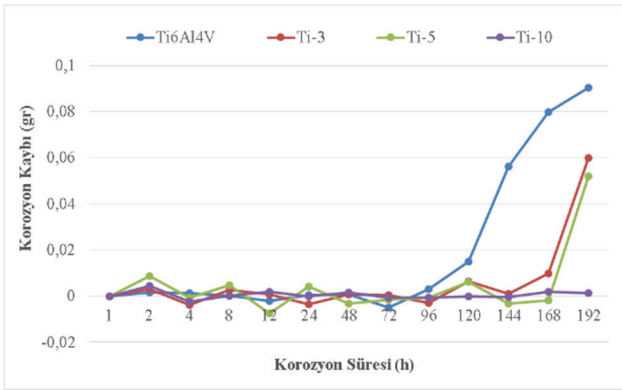
Tablo2. MAO Öncesi Ve Sonrası Numunelerin Yüzey Pürüzlülüğü

Numune Kodları	Yüzey Pürüzlülüğü (µm)	Tabaka kalınlığı (µm)
Ti6Al4V	2,86	-
Ti-3	3,53	23,4±5
Ti-5	3,75	28,25±5
Ti-10	3,98	34,65±5

3.2 Kaplamaların Korozyon Davranışı (Corrosion behaviors of the coatings)

Kaplama öncesi ve sonrası hazırlanan numuneler % 2g/l'lik NaOH çözeltisi içine daldırılarak ağırlık kayıpları ölçülerek korozyon dayanımları

belirlenmiştir. Şekil 4’de kaplanmamış Ti6Al4V ve kaplanan numunelerin korozyon dayanım grafiği verilmiştir. Alınan ölçümler neticesinde kaplanmamış numunede 96 saat sonrasında ağırlık kaybında artış başlamışken, 168 saat süresine kadar kaplanan numunelerin ağırlık kayıplarında fazla değişim meydana gelmemiştir. Miligram seviyelerinde azalma ve artışlar görülmüştür. Kaplanan numunelerde ve Ti6Al4V numunesinde korozyon başlangıcına kadar oksit film oluşmuş olma ihtimali ile zaman zaman ağırlıklarında artış görülmüştür. 168 saat sonunda Ti-3 ve Ti-5 numunelerinde dökülmeler meydana gelmiştir. Kaplama tabakası kalınlığı en yüksek olan Ti-10 nolu numunede aynı süreler içinde dökülme meydana gelmemiştir. Artan kaplama süresiyle korozyon direncinde artış görülmüştür. Çünkü artan süre ile kaplama yoğunluğu artmış olduğundan korozyon çözeltisinin Ti-10 nolu numunede altlığa ulaşması daha güç olmuştur.



Şekil 4. Ti6Al4V ve MAO ile kaplanan numunelerin korozyon dayanımı

Malzemelerin korozyona direnç göstermelerinin birçok nedeni vardır. Oluşan film tabakası kalınlık, mikroyapı morfolojisi. Ti-10 nolu numunede en kalın kaplama kalınlığına sahip olması sebebi ile en yüksek dayanımı göstermiştir. Sonuç itibari ile MAO ile kaplanan tüm numuneler altlık malzemeye göre daha korunmuştur. Kaplama sonrası oluşan seramik esaslı film koruyucu tabaka oluşturmuştur.

4. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Farklı sürelerde MAO ile kaplanan Ti6Al4V alaşımı ile yapılan çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir;

Mikro ark işlemi sonrasında yüzeyde poroz oksit bir tabaka elde edilmiştir. Kaplamanın büyüme mekanizmasında kaplama süresi önemlidir. Artan işlem süresinin oksit tabakasının kalınlığına,

ortalama yüzey pürüzlülüğüne önemli ölçüde etki etmektedir. Artan süre ile kaplama kalınlığı ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Maksimum tabaka kalınlığı Ti-10 numunesinde ortalama 34,65 µm ölçülmüştür. Kaplanan tüm numunelerin korozyon dayanımı kaplama öncesine göre artış göstermiştir. 192 saat süresince yapılan korozyon çalışması sonrasında en kalın ve yoğun kaplamaya sahip olan Ti-10 numunesi en yüksek dayanım göstermiştir.



TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma; Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu (Proje No: 2016-01-08-018)tarafındandesteklenmiştir. Deneysel çalışmalara katkıları için Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BAPK) teşekkürü bir borç bilirim.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Qingbiao Li Wenbin Yang, Cancan Liu, Daoai Wang, Jun Liang, Correlations between the growth mechanism and properties of micro-arc oxidation coatings on titanium alloy: Effects of electrolytes, *Surface & Coatings Technology* 316 (2017) 162–170.
- [2] Yi Wang, Huijun Yu, Chuanzhong Chen, Zhihuan Zhao , Review of the biocompatibility of micro-arc oxidation coated titanium alloys, *Materials and Design* 85 (2015) 640–652.
- [3] Laís T. Duarte, Claudemiro Bolfarini, Sonia R. Biaggio, Romeu C. Rocha-Filho, Pedro A.P. Nascente , Growth of aluminum-free porous oxide layers on titanium and its alloys Ti-6Al-4V and Ti-6Al-7Nb by micro-arc oxidation, *Materials Science and Engineering C* 41 (2014) 343–348.
- [4] M. Shokouhfar, S.R. Allahkaram, Effect of incorporation of nanoparticles with different composition on wear and corrosion behavior of ceramic coatings developed on pure titanium by micro arc oxidation, *Surface & Coatings Technology* 309 (2017) 767–778.

- [5] Jun-Hua Wang Jin Wang, Yan Lu, Mao-Hua Du, Fu-Zhu Han, Effects of single pulse energy on the properties of ceramic coating prepared by micro-arc oxidation on Ti alloy, *Applied Surface Science* 324 (2015) 405–413.
- [6] Joanna Karbowniczek, Faiz Muhaffel, Grzegorz Cempura, Huseyin Cimenoglu, Aleksandra Czyrska Filemonowicz, Influence of electrolyte composition on microstructure, adhesion and bioactivity of micro-arc oxidation coatings produced on biomedical Ti6Al7Nb alloy, *Surface & Coatings Technology* 321 (2017) 97–107.
- [7] Xue Han, Hongchen Liu, Dongsheng Wang, Shujun Li, Rui Yang, Xiaojie Tao, Xiaohong Jiang, In vitro Biological Effects of Ti2448 Alloy Modified by Micro-arc Oxidation and Alkali Heatment, *J. Mater. Sci. Technol.*, 2011, 27(4), 317-324.
- [8] Shimin Liu, Baoe Li, Chunyong Liang, Hongshui Wang, Zhixia Qiao, Formation mechanism and adhesive strength of a hydroxyapatite/TiO₂ composite coating on a titanium surface prepared by micro-arc oxidation, *Applied Surface Science* 362 (2016) 109–114.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 27-03-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 07-11-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.300934	

Jeopolimer Harçlarda dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi ile incelenmesi

Mehmet Kaya^{*1}, Mücteba Uysal², Kemalettin Yılmaz³

ÖZ

Çimento, insanoğlunun son iki yüz yıldır yaygın olarak kullandığı en önemli yapı malzemelerinden birisidir. Çimentonun üretimi sırasındaki yüksek enerji ihtiyacı ve açığa çıkan CO₂ gazının atmosfere vermiş olduğu zararlı etki, son yıllarda en çok üzerinde düşünülen konulardan birisidir. Bu sebeple çimentoya alternatif bağlayıcı yapı malzemesi üretimi için birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Metakaolin, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi malzemelerin çeşitli kimyasal aktivatörler ile karıştırılarak aktive edilmesi sonucu çimento benzeri bağlayıcı yapı malzemesi üretmek mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada uçucu külün, sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) ile aktive edilmesi sonucu elde edilen jeopolimer harçların çeşitli yaş gruplarındaki dayanımları ile kür sıcaklığı ve boşluk oranı ilişkisinin varyans analizi araştırılmıştır. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Numunelerin boşluk oranları, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermemiştir. Jeopolimeri oluşturan malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada sosyal bilimler istatistik programı (SPSS) kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: jeopolimer, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, varyans analizi

Investigation of the relationship between strength, curing temperature and void ratio in Geopolymer Mortar with variance analysis

ABSTRACT

Cement is one of the most important building materials that human beings have used extensively in the past two and a half years. The high energy requirement in the production of cement and the detrimental effect of CO₂ gas released to the atmosphere is one of the most controversial issues in recent years. For this reason, a number of studies have been carried out for the production of alternative binding material for cement. It is possible to produce cement-like binder-like building material by mixing materials such as metakaolin, blast furnace slag and fly ash with various chemical activators. In this study, variance analysis of cure temperature and void ratio relation of various age groups of geopolymer mortars obtained after the activation with fly ash, sodium hydroxide (NaOH) and sodium silicate (Na₂SiO₃) was investigated. No significant change was observed between the compressive and flexural strengths of different ages of samples produced by curing at different temperatures. The void ratios of the samples did not show a significant change with respect to the age of the sample. It was found that there is a significant relationship

¹ Bozok Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Bölümü, mehmet.kaya@bozok.edu.tr

² İstanbul Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mucteba.uysal@istanbul.edu.tr

³ Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, kmyilmaz@sakarya.edu.tr

between the compressive strengths and the material variables forming the geopolymer. Social sciences statistics program (SPSS) was used in the study.

Keywords: geopolymer, compressive strength, flexural strength, analysis of variance

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çimento sektörü enerjiye dayalı bir sektör olup, çimento maliyetinin %59,1' ini enerji oluşturmaktadır [1]. Bunun yanı sıra 1 ton çimento üretimi sırasında atmosfere yaklaşık 900 kg CO₂ salınımı gerçekleşmektedir. Dünyada 30 gigametrik ton CO₂ salınımının %5'i, çimento sektöründen kaynaklanmaktadır [2]. 2014 yılı itibariyle dünya genelinde çimento üretiminin 4,3 milyar tona ulaştığı belirtilmektedir [3]. Çimentonun çevreye olumsuz etkilerine karşılık sürdürülebilir bir çevre koruma çalışması için, çimentoya alternatif bağlayıcı yapı malzemesi üretimine yönelik yapılan çeşitli çalışmalar son yirmi yıldır hız kazanmıştır. Metakaolin, kırmızı çamur vb, doğal malzemelerin yanı sıra yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıkların NaOH, KOH ve Na₂SiO₃ gibi çeşitli kimyasallarla aktive edilmesi sonucu bağlayıcı yapı malzemesi üretmek mümkün olabilmektedir [4]. Özellikle yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel ürünlerin geri dönüşümün sağlanması açısından alkaliler kullanılarak harç üretilmesi çalışmaları 1960'lı yıllardan beri devam etmektedir [5]. Metakaolin, kireç, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi doğal ve endüstriyel atık malzemelerin alkalilerle aktivasyonu sonucu jeopolimer [6] adı verilen bağlayıcı elde edilmektedir. Jeopolimer harçlarda, yüksek basınç dayanımı, yüksek sıcaklık dirençleri ve yüksek aşınma dayanımı gibi olumlu özelliklerinin yanı sıra, düşük sülfat dayanımları, yüksek kılcallık gibi olumsuzluklarda gözlenmektedir. Donma-çözülme dirençleri boşluk yapısının azalması ile artmaktadır [7]. Çimento ve su karışımı sertleştiğinde yapısında su bulunan C-S-H jelleri oluştuğu için refrakter malzeme yapımında bağlayıcı olarak kullanılamamaktadır. Jeopolimerlerin oluşumu sonucu yapısında gözlenen N-A-S-H jellerinde ise su bulunmamaktadır. Jeopolimer üretiminde, karışım aşamasında kullanılan su işlenebilirlik için kullanılmakta, jeopolimerin kuruması sırasında jeopolimer içerisinde süreksiz ve küçük boşluklar bırakarak jeopolimeri terk etmektedir. Bu durum jeopolimere hafiflik, ısı yalıtımı ve yangın direnci gibi olumlu özellikler kazandırmaktadır [8].

Jeopolimer üretiminde kullanılan uçucu küllerin karakteristikleri ne olursa olsun aktivasyon sonucu tamamında amorf yapı oluşmaktadır. Genellikle en yüksek dayanımın sodyum silikat içeren aktivatör ile elde edilmektedir. Bunun yanında SiO₂/Na₂O kütle oranı ve Si/Al atomik oranı arttıkça basınç dayanımının arttığını, yüksek basınç dayanımının direkt olarak Si/Al atomik oranıyla ilgilidir [9]. Jeopolimerin taze ve sertleşmiş durumdaki davranışı üzerinde, uçucu külün tipi, tane dağılımı, mineralojik kompozisyonu ve artan sodyum silikat karışım oranı etkilidir [10]. Literatürde su/jeopolimer oranı ve aktivatör/uçucu kül oranının basınç dayanımı ve işlenebilirlik üzerine direkt etkisi olduğu belirtilmekle birlikte, sıvı alkali/su oranı jeopolimerin dayanımına en etkili faktördür [11].

Bu çalışmada, F sınıfı uçucu kül, kum, NaOH+Na₂SiO₃ karışımı ile 90 °C' de 48 saat süre ile aktive edilerek 3 gün ile 180 gün arasındaki eğilme ve basınç dayanımlarının, kür sıcaklığı, boşluk oranı arasındaki ilişki sosyal bilimler istatistik programı ile incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Numunelerin boşluk oranları, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermemiştir. Jeopolimeri oluşturan malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1.Materyal (Material)

Deneysel çalışmada kullanılan sodyum hidroksit (NaOH) kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. NaOH'un kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of NaOH)

Kimyasal Adı	Sodyum Hidroksit (Kostik)
Kimyasal Formülü	NaOH
Molekül ağırlığı	40 gr/mol
Asidimetrik	≥97
Na ₂ CO ₃	≤1
Cl	<0,01
SO ₄	≤0,01
Ağır Metal	≤0,002
Al	≤0,002
Fe	≤0,002

Cam suyu olarak bilinen sodyum silikat ticari olarak kapalı plastik ve cam kaplarda sıvı olarak satılmaktadır. Çalışmada kullanılan sodyum silikatın kimyasal kompozisyonu Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Na₂SiO₃'ün kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of Na₂SiO₃)

Kimyasal Adı	Sodyum Silikat (Cam suyu)
Kimyasal Formülü	Na ₂ SiO ₃ nH ₂ O
Molekül ağırlığı	122,06 g/mol
Yoğunluk	1,39 g/cm ³ (20 C'de)
Ağırlıkça Modül	2,00
SiO ₂ /Na ₂ O	
Na ₂ O	%11,71
SiO ₂	%23,46
Demir(Fe)	39 ppm
Klor (Cl)	%0,01
Sülfat (SO ₄)	%0,01

Çalışmada kullanılan F sınıfı uçucu kül, Kütahya Tavşanlı'da Bulunan Tunçbilek Termik Santrali'nden tedarik edilmiştir. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Tunçbilek F sınıfı uçucu külünün fiziksel ve kimyasal özellikleri (Physical and chemical properties of Tunçbilek F class flyash)

Kimyasal kompozisyon	(%)
MgO	3,68
Al ₂ SO ₃	21,41
SiO ₂	58,73
SO ₃	0,25
Na ₂ O	0,28
Ka ₂ O	1,65
CaO	1,88
Fe ₂ SO ₃	10,46
Çözünmez kalıntı	24,33
Kızdırma kaybı	0,64
TOPLAM	98,98
Fiziksel özellikler	
Özgül ağırlık (ton/m ³)	2,24
45 mikron elek bakiyesi (%)	4,9
Blain özgül yüzey (cm ² /gr)	3703

Çalışmada harç karışımlarının tamamında içme suyu şebekesinden alınan su kullanılmış olup kimyasal özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. İçme suyu şebekesinden alınan suyun kimyasal özellikleri (Chemical properties of water from drinking water network)

Al (µg/l)	Fe (µg/l)	Amonyum (mg/l)	İletkenlik (µg/cm)	Nitrit (mg/l)	pH
0	10	0,13	730	0	7,96

Deneylede, TS EN 196-1'e [12] uygun, maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Tablo 5'te standart kumun granülometrisi ve sınır değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Standart kumun granülometrisi ve sınır değerleri (Standard sand granulometry and boundary values)

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0,08	0,16	0,5	1	1,6	2
Kalan (%)	99	85	64	36	9	0
Sınır Değer (%)	99±1	87±5	67±5	33±	7±5	0

2.2.Yöntem (Method)

Bu çalışmada, Kütahya Tunçbilek Termik Santrali'nden sağlanan, separe edilmiş F tipi uçucu kül; ağırlıkça %14 Na içeren, silikat modülü Ms=0,2 olan, Na₂SiO₃ ve NaOH karışımı aktivatör ile aktive edilerek jeopolimer harç numuneler üretilmiştir. Numunelere, 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C ve 100 °C de 48 saat süreyle sıcaklık kürü uygulanmıştır. Sıcaklık küründen çıkarılan numuneler, 3-7-14-28-90-180 günü tamamlayacak şekilde ±22 °C oda sıcaklığında, havada kür edilmiştir. Daha sonra eğilme ve basınç dayanımları test edilmiştir. Eğilme ve basınç dayanımlarının, kür sıcaklığı ve boşluk oranı ile ilişkisi varyans analizi yöntemi ile incelenmiştir. Ayrıca, F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde, değişkenlerin basınç dayanımı üzerine etkilerinin anlamlı olup olmadığı kontrol edilmiştir.

Numunelerin standart harç mikserinde hazırlanması ve etüve yerleştirme biçimleri Şekil 1'de gösterilmiştir.

Basınç ve eğilme testleri ile ilgili çalışmalar Şekil 2'de verilmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI VE VARYANS ANALİZİ (TEST RESULTS AND VARIANCE ANALYSIS)

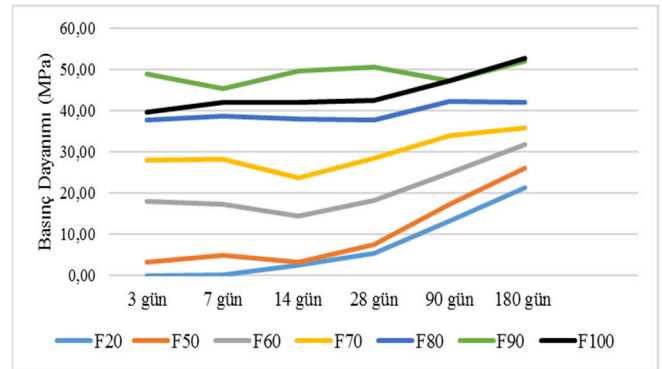
Numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları şekil 3'teki grafikte verilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilen numunelerin basınç dayanımları, 3.günde 0,00-48,96 MPa arasında değişim gösterirken, 360 gün sonra 28,75-52,01 MPa arasında değişim göstermektedir. 20 °C'de kür edilen numunelerin 3 günlük basınç dayanımları ile 90 °C'de kür edilen numunelerin 3 günlük basınç dayanımları arasında 48,96 MPa bir fark gözlenirken, 180 günlük basınç dayanımları arasındaki fark 30,77 MPa olarak tespit edilmiştir. Kür sıcaklığının artışı ile birlikte basınç dayanımında artış gözlenmiştir. Sıcaklık artışı, jeopolimer harçlarda aktivatörün kimyasal reaksiyonunu artırarak dayanım artışına neden olmaktadır [7]. Düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin basınç dayanımları yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelere göre ilerleyen yaşlarda daha fazla artış göstermiştir. Bu durum, düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin içerisinde aktive olmamış aktivatörün varlığından kaynaklanmaktadır. Yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelerde, aktivatör reaksiyonu tükendiği için ilerleyen yaşlarda dayanım artışı az olmaktadır.



Şekil 1. Numunelerin üretilip etüve konulması (Making samples and putting the flour)

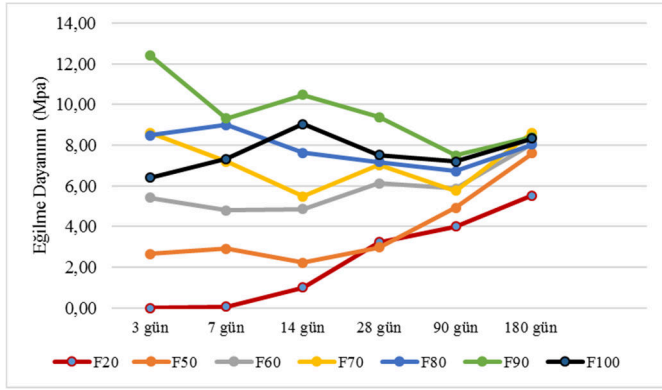


Şekil 2. Basınç ve Eğilme deneylerinin yapılması (Performing Compressive and Flexural tests)



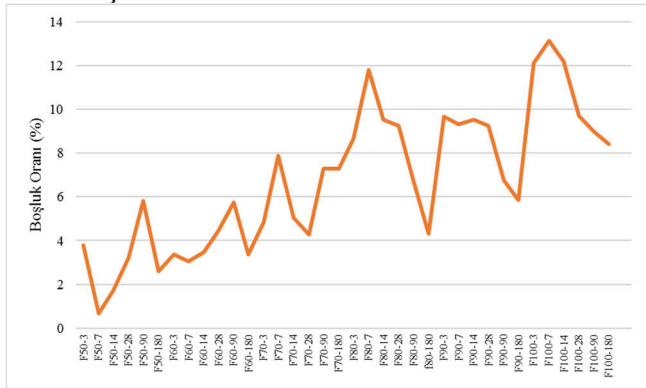
Şekil 3. F Sınıfı Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Çimentosuz Numunelerin Basınç Dayanımları (Compressive Strength of Cementless Samples Produced Using F Class Fly Ash)

Numunelerin eğilme dayanımlarına ait deney sonuçları şekil 4'teki grafikte verilmiştir. Basınç dayanımında olduğu gibi düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin eğilme dayanımları yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelere göre ilerleyen yaşlarda artış eğilimindedir.



Şekil 4. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin eğilme dayanımları (Bending strengths of cement-free specimens produced using F class fly ash)

Numunelerin boşluk oranlarına ait deney sonuçları şekil 5’teki grafikte gösterilmiştir. Kür sıcaklığının artması ile numunelerin boşluk oranlarının arttığı tespit edilmiştir. Bu durum numunelerin her sıcaklık grupları için geçerlidir. Yüksek sıcaklıkta kür edilen numuneler içerisindeki su buharlaşım numuneyi terk ettiği için boşluk oluşmaktadır. Düşük sıcaklıkta kür uygulanmış numuneler, yüksek sıcaklıkta kür uygulanmış numunelere göre daha fazla su içerdiğinden boşluk oranları daha düşüktür.



Şekil 5. F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen çimentosuz numunelerin boşluk oranları (Void ratios of cementless samples produced using F class fly ash)

varyans analizi iki ya da daha fazla gruba ait ortalamalar arasındaki farkın anlamlı olup olmadığı ile ilgili hipotezleri test etmek için kullanılmaktadır. Eğer ikiden fazla grubun ortalamaları karşılaştırılacak ise F Testi diğer bir isimle varyans analizi uygulanır. İki den fazla grubun ortalamaları arasında anlamlı bir farklılık olup olmadığını test eden F testinin hipotezi aşağıdaki gibidir [13].

$H_1: X_1 = X_2 = X_3 = \dots = X_N$ Yani ortalamalar arasında fark yoktur.

H_2 : Ortalamalardan en az ikisi arasında anlamlı fark vardır.

Bu çalışmadaki hipotezler SPSS(Sosyal Bilimler İstatistik Programı) kullanılarak test edilmiştir.

3.1. Jeopolimer numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları analizi (Analysis of compressive strengths of samples of different ages with curing temperature in geopolymer samples)

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak F sınıfı uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim olup olmadığının araştırılması:

Hipotez;

H_1 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

H_2 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

Numune kodlamalarında sıcaklık esas alınmıştır. 50 °C-60 °C-70 °C-80 °C-90 °C-100 °C’de kür edilmiş numuneler için, sırasıyla F50- F60- F70- F80- F90- F100 kodları verilmiştir. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları (Samples, mean, standard deviation and standard errors)

Tanımlamalar	Ortalama için 95% güven aralığı							
	Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum
F50	6	29,3367	16,77559	6,84861	11,7318	46,9416	3,21	48,96
F60	6	28,0367	16,33750	6,66976	10,8915	45,1818	4,89	45,34
F70	6	29,8933	17,02368	6,94989	12,0281	47,7586	3,30	49,61
F80	6	33,6200	15,44709	6,30625	17,4093	49,8307	7,63	50,64
F90	6	36,8850	11,41320	4,65942	24,9076	48,8624	17,25	47,21
F100	6	40,8617	12,08273	4,93276	28,1816	53,5417	25,96	52,69
Total	36	33,1056	14,65271	2,44212	28,1478	38,0633	3,21	52,69

Varyans analizi sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin basınç dayanımları varyans analizi (Variation analysis of compressive strengths of samples of different ages with curing temperature)

BASINÇ	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar arası	749,536	5	149,907	0,665	0,653
Grup içi	6765,031	30	225,501		
Toplam	7514,567	35			

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri $p=0,653>0,05$ bulunmuştur. Bu durumda H_1 hipotezi kabul edilir; Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur. Bu sonuç jeopolimer harçlar için beklenen bir durumdur. Jeopolimer harçlardaki karmaşık kimyasal reaksiyon, geleneksel harçlarda olduğu gibi ilerleyen yaşlarda basınç dayanımında anlamlı bir artışa neden olmamaktadır [6].

3.2 Jeopolimer numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları analizi (Analysis of bending strengths of samples of different ages with curing temperature in geopolymer samples)

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak, F tipi uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim olup olmadığının araştırılması:

Hipotez;

H_1 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur.

H_2 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim vardır.

Tablo 8 numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları verilmiştir. Numune kodlamalarında sıcaklık esas alınmıştır. Sırasıyla 50 °C-60 °C-70 °C-80 °C-90 °C-100 °C’de kür edilmiş numune için sırasıyla F50- F60- F70- F80- F90- F100 kodları verilmiştir.

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri $p=0,39>0,05$ bulunmuştur. Bu durumda H_1 hipotezi kabul edilir; farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı

yaşlardaki eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim yoktur. Jeopolimer harçlarda, basınç dayanımında olduğu gibi eğilme dayanımında da zamana bağlı dayanım artış veya azalışı, aktivatörün oranı, kür sıcaklığı, bağlayıcı özellikleri gibi birçok faktöre bağlıdır [7].

Tablo 8. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları (Samples, mean, standard deviation and standard errors)

Tanımlamalar		Ortalama için 95% güven aralığı						
Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum	
F50	6	9,4050	5,23602	2,13760	3,9101	14,8999	2,65	17,88
F60	6	6,7533	2,47504	1,01043	4,1559	9,3507	2,91	9,30
F70	6	6,6183	3,01692	1,23165	3,4523	9,7844	2,23	10,48
F80	6	6,7000	2,11468	0,86332	4,4808	8,9192	2,98	9,38
F90	6	6,3300	0,98065	0,40035	5,3009	7,3591	4,92	7,50
F100	6	8,1667	0,35246	0,14389	7,7968	8,5365	7,59	8,60
Total	36	7,3289	2,85084	0,47514	6,3643	8,2935	2,23	17,88

Tablo 9’ da varyans analizi sonuçları verilmiştir.

Tablo 9. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin eğilme dayanımları varyans analizi (Variation analysis of bending strengths of samples of different ages with curing temperature)

	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar arası	43,449	5	8,690	1,082	0,390
Grup içi	241,007	30	8,034		
Toplam	284,456	35			

3.3. Jeopolimer numunelerde kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin boşluk oranı analizi (Analysis of void fraction of samples of different ages with curing temperature in geopolymer samples)

Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak F tipi uçucu kül ile üretilmiş çimentosuz numunelerde, boşluk oranının, numune yaşına göre değişim gösterip göstermediğinin araştırılması:

H_1 : Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirimli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermez.

H₂: Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirimli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim gösterir. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 11'de varyans analizi sonuçları verilmiştir. %95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre basınç dayanımı için anlamlılık değeri $p=0,898>0,05$ bulunmuştur. Bu durumda H₁ hipotezi kabul edilir; Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin geçirimli boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermez.

Tablo 10. Numunelerin, ortalama, standart sapma ve standart hataları (Samples, mean, standard deviation and standard errors)

Tanımlamalar								
Örnek	Ortalama	Std. Sapma	Std. Hata	Ortalama için 95% güven aralığı				
				Alt Sınır	Üst Sınır	Minimum	Maximum	
F50	6	7,0700	3,58685	1,46432	3,3058	10,8342	3,36	12,11
F60	6	7,6450	4,90300	2,00164	2,4996	12,7904	0,68	13,15
F70	6	6,9133	4,09396	1,67135	2,6170	11,2097	1,73	12,20
F80	6	6,6917	3,00765	1,22787	3,5353	9,8480	3,22	9,70
F90	6	6,8983	1,18643	0,48436	5,6533	8,1434	5,76	9,00
F100	6	5,2983	2,28340	0,93220	2,9020	7,6946	2,58	8,42
Total	36	6,7528	3,22951	0,53825	5,6601	7,8455	0,68	13,15

Tablo 11. Kür sıcaklığı ile farklı yaşlardaki numunelerin boşluk oranı varyans analizi (Variance analysis of void ratio of samples of different ages with curing temperature)

	Kareler Toplamı	df	Ortalama Kare	F	Sig.
Gruplar arası	18,377	5	3,675	0,318	0,898
Grup içi	346,665	30	11,555		
Toplam	365,041	35			

Boşluk oranı, kür sıcaklığı arttıkça artmakla birlikte, numunenin yaşı ilerledikçe de boşluk oranı artmaktadır. Varyans analizi kür sıcaklığına bağlı gruplandırma yaptığı için anlamlı değişim görülmemesi beklenen bir sonuç olarak düşünülmektedir.

3.4. Jeopolimer numunelerde, değişkenlerin basınç dayanımı üzerine etkileri (the effect of variables on compressive strength in geopolymer samples)

F sınıfı uçucu kül ile üretilen çimentosuz numunelerde su oranı, NaOH miktarı ve Na₂SiO₃ miktarlarının ortalama, standart sapma değerleri Tablo 12'de, model özeti ise Tablo 13'de verilmiştir.

Tablo 12. Değişkenlerin ortalama ve standart sapma değerleri (Mean and standard deviation values of variables)

Malzeme	Ortalama	Standart Sapma
Su	Örnek	30
	Std. Sapma	57,0828
	Toplam	2139,63
	Ortalama	80,5937
NaOH	Örnek	30
	Std. Sapma	47,4318
	Toplam	2417,81
Na ₂ SiO ₃	Ortalama	136,524
	Örnek	30
	Std. Sapma	97,5348
Basınç Dayanımı	Toplam	4095,72
	Ortalama	19,6463
	Örnek	30
	Std. Sapma	9,8111
	Toplam	589,39

Tablo 13. Model özeti (Model summary)

Model	İstatistiksel değişim								
	R	R kare	Düzeltilmiş R Square	Tahminin standart hatası	R kare değişimi	F değişimi	df1	df2	Sig. F değişimi
1	0,495(a)	0,246	0,230	8,49283	0,246	15,836	3	146	0,000

a Belirleyiciler: (İçerik), Na₂SiO₃, NaOH, Su

%95 güven düzeyinde yapılan F testi sonucuna göre, malzemelerin basınç dayanımı üzerine etkisi için anlamlılık değeri $p=0,000<0,05$ bulunmuştur. Bu durumda malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilir. Malzemeler ile basınç dayanımı arasındaki varyans analizi sonuçları Tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Malzemeler ile basınç dayanımının varyans analizi (Variance analysis of pressure resistance with materials)

Model		Kareler toplamı	df	Ortalama kare	F	Sig.
1	Regression	3426,593	3	1142,198	15,836	0,000(a)
	Residual	10530,710	146	72,128		
	Total	13957,303	149			

a Belirleyiciler: (İçerik), Na₂SiO₃, NaOH, Su,

b Bağımlı değişken: basınç

Malzemelerin, basınç dayanımı ile ilişkisini gösteren katsayılar Tablo 15 verilmiştir. Model özetindeki R değeri, su, NaOH ve Na₂SiO₃'ün basınç dayanımı üzerinde 0,495 oranında etki ettiğini göstermektedir. Numunelerin tamamında aynı aktivatör oranı kullanıldığından dolayı, bağımsız değişkenler olan su, NaOH ve Na₂SiO₃'ün, basınç dayanımı üzerine etkisini standart katsayılı formül haline getirmek mümkün olmamaktadır.

Tablo 15. Malzemelerin İlişki katsayıları (Relation coefficients of materials)

Model	İçerik	Standart dışı katsayılar		Standart Katsayılar		
		B	Std. hata	Beta	t	Sig.
1	(İçerik)	0,623	20,236		0,031	0,976
	Su	0,192	0,131	1,116	1,461	0,156
	NaOH	-0,038	0,041	-0,184	-0,926	0,363
	Na ₂ SiO ₃	0,062	0,077	0,612	0,797	0,433

a. Bağımlı değişken: Basınç dayanımı

4. SONUÇ (RESULT)

Üretilen numunelerin, boşluk oranları, eğilme ve basınç dayanımları incelenmiş, daha sonra dayanım, kür sıcaklığı ve boşluk oranları ile ilgili hipotezler ortaya atılmıştır. Hipotezlerin doğruluğu SPSS programı yardımıyla varyans analizi yapılarak kontrol edilmiştir. Sonuç olarak;

1. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmemiştir. Yapılan çalışmalarda, düşük sıcaklıkta kür edilen numunelerin, yüksek sıcaklıkta kür edilen numunelere göre ilerleyen yaşlarda daha fazla dayanım kazandığını, dayanım artışının ise geleneksel betonlara kıyasla zamana bağlı olarak fazla artış göstermediği belirtilmektedir [7].
2. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin, farklı yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımları arasında anlamlı bir değişim gözlenmemesi jeopolimer reaksiyonunun karmaşık yapısından kaynaklandığı düşünülmektedir [6].
3. Farklı sıcaklıklarda kür uygulanarak üretilmiş numunelerin boşluk oranı, numune yaşına göre anlamlı değişim göstermemiştir. Bu durum, jeopolimerlerin



oluşumu sonucu yapısında gözlenen N-A-S-H jellerinde suyun bulunmaması ve geleneksel betonlardaki gibi hacmi artan hidrasyon ürünleri oluşmamasından kaynaklanmaktadır [8].

4. Jeopolimeri oluşturan malzeme değişkenleri ile basınç dayanımı arasında anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilir. Varyans analizi, su, NaOH ve Na₂SiO₃'ün basınç dayanımı üzerinde 0,495 oranında etki ettiğini göstermektedir. Jeopolimer betonlarda, aktivatör miktarının artması ile birlikte dayanımın artış gözleneceği literatürde yer almaktadır [14].

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Atig, Cement industry report. <https://www.atig.com.tr/arastirma/raporlar/t/r/cimento> (2015).
- [2] Engin. Y., Sustainability - Leading Role in Concrete Innovation, *Turkish Ready mixed concrete association*, June 2016, Pages 74-76
- [3] The European Cement Association, Activity Report <http://www.cembureau.be>, (2014).
- [4] Faten, S., Hani, K., Jan, W., 2013. Characterization of alkali activated kaolinitic clay. *Appl. Clay Sci.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.05>
- [5] Roy, D.M., Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 1999. 29(2): p. 249-254
- [6] J. Davidovits, *Geopolymers and geopolymeric materials*, *J. Therm. Anal.* 35 (no.2) (Mar. 1989) 429-441
- [7] Kaya, M. 2016, "Examination of mechanical and durability properties of various types of fly ash produced by using alkali activated mortars", *Sakarya University, The Graduate School Of Naturel and Applied Science, Civil Engineering Department, PhD thesis*
- [8] Rangan, B.V. 2008. "Fly ash-based geopolymer concrete". *Research Report GC 4, Engineering Faculty, Curtin University of Technology* SF:44, Perth, Australia.
- [9] Komljenovic, M., Bascarić, Z., Bradic, V. 2010. "Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers". *J. Hazard. Mater.*, 181: 35-42

- [10] Bignozzi, M.C., Manzi, S., Natali, M.E., Rickard, W.D.A., Riessen, A. 2014. "Room temperature alkali activation of fly ash: The effect of Na₂O/SiO₂ ratio. *Const. Build. Mater.*",69: 262-270.
- [11] Junaid, M.T., Kayali, O., Khennane, A., Black, J. 2015. "A mix design procedure for low calcium alkali activated fly ash-based concretes". *Construct. Build. Mater.*,79: 301-310.
- [12] TS EN 196-1:2005, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini.
- [13] <http://spssanalizi.com/> (01.02.2017)
- [14] Petermann, J.C., Saeed, A., Hammons, M.I. 2010. "Alkali-Activated Geopolymers: A Literature Review". *Air Force Research Laboratory Materials and Manufacturing Directorate Airbase Technologies Division*.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 04-10-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 13-11-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.341742	

Toplantı tutanaklarının analizi ile bir karar destek sistemi

Feyza Gürbüz*¹ Esra Kahya Özyirmidokuz²

ÖZ

Günümüzde veri madenciliği firmalar açısından çok önemli hale gelmiştir. Firmalar sektörde rekabet avantajı sağlayabilmek için veri madenciliği tekniklerini kullanarak büyük veriden işlerine yarayacak, daha önceden keşfedilmemiş, kullanılabilir örüntüler elde eder. Gelişen haberleşme teknolojileri sonucu firmalarda biriken veri yığınları, firmalar için hayati önem taşıyan bilgileri içinde barındırır. Karar vericiler, klasik tekniklerle bu verilerden çıkarımlarda bulunurken, önemli bilgileri gözden kaçırmalar. Veriyi doğru yönetemeyen firmalar ise işlerine yaramayan veri yığınlarında kaybolur. Bir işletmeye ait sayısal platformdaki bu verilerin %80'i metin formundadır. Ancak yapısal olmayan verileri de içeren büyük veri klasik istatistiksel tekniklerle analiz edilen veriler kadar kolay işlenemez. Doğal dil işleme tekniklerinden faydalanılması gerekmektedir. Böylece, soyut ve yığın yapısal olmayan bilgiler, sayısal somut ifadelere dönüştürülebilmektedir. Bu araştırma, Kayseri'de bir imalat fabrikasında yapılan üst düzey toplantıların metin formatındaki tutanaklarını analiz ederek bilgi çıkarımı gerçekleştirmektedir. Yöneticilerin verdiği stratejik kararlarda önemli toplantı sonuçları çok etkilidir. Araştırmanın en genel amacı toplantıların kalitesini artırmaktır. Araştırmada, toplantı tutanaklarından kelime çıkarımı yapılarak, toplantılara ait genel konu başlıkları metin madenciliği ile elde edilecektir. Yöneticiler çeşitli madencilik teknikleriyle gruplanmış konu başlıklarına göre değerlendirme yaparak sonraki toplantıların kalitesini artırarak zaman kazanabilir.

Anahtar Kelimeler: Metin madenciliği, Doğal dil işleme, Yönetim, Üretim Toplantı Raporları

A decision support system by analysis of the meeting reports

ABSTRACT

Recently, data mining has become crucial for firms. Using data mining, Firms, in order to have comparative advantage in industry / sector / market, obtain patterns that they can utilize and that have not been discovered before. The data accumulated as a result of the advanced communication channels within firms contain crucial information. Decision makers' undersees important information while they use classical

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author

¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Müh. Bölümü 38039, Kayseri, feyza@erciyes.edu.tr

² Erciyes Üniversitesi Kayseri MYO 38039 Melikgazi Kayseri, esrahahya@erciyes.edu.tr

techniques for data analysis. Firms that cannot manage data accurately get lost in piles of data that would not be useful for them. 80% of the data in the quantitative platform belonging to a firm is in text format. However, large data containing non-structural data cannot be analyzed as easily as the data analyzed by using classical statistical techniques. Natural language analysis techniques should be used. In this way, abstract and non-structural data can be converted into concrete and quantitative statements. In this analysis, information is inferred by the analysis of transcripts—in text format—of meetings among senior managers at a manufacturing company in Kayseri. Outcomes of the important meetings are very crucial in the decisions the directors take. The main goal of the study is to increase the efficiency of the meetings. In this research, the general themes of the meetings are found out by word inference from the meeting transcripts. Directors can have better time-management by increasing the quality of the future meetings by conducting evaluations according to the topics categorized by the data mining techniques.

Keywords: Text Mining, Natural language processing, Management, Manufacturing meeting reports

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İşletmelerde güçlü bilgi sistemlerinde depolanan büyük veri yığınları, potansiyel yeni bilgiyi içinde barındırır. Bu verileri tüm süreçlerden eşzamanlı toplamak, otomatik analiz tekniklerini kullanarak bilgiyi seçmek ve analiz işlemleri çok karmaşıktır. Bu veriler, imalat firmalarında, makine, ürün, süreç, bakım, kalite kontrol, hata teşhisi, vs. veriler olabilir ve tipik olarak, veri tabanlarında depolanır. Bu veri yığınları, içerinde de gizli ve değerli bilgiler barındırmaktadır. Bu bilgiler, günümüz koşullarında işletmelere rekabet avantajı sağlamak açısından önemlidir. Örneğin, bilgi çıkarımı sonucunda imalat sürecinde verimlilik artışı için yapılması gerekli ve önemli bilgiler elde edilir. Veri tabanlarında bilgi keşfi süreci (KDD)'nin bir adımı olan fakat zamanla KDD'nin kendisiyle aynı anlamda kullanılmaya başlayan veri madenciliği (DM), büyük miktardaki verilerden otomatik bir şekilde kullanışlı ve daha önceden keşfedilmemiş bilgiyi zeki tekniklerle çıkan bir bilgisayar bilimidir. Metin madenciliği (TM), yapısal olmayan veri türünün analizini yapmak için kullanılan DM yöntemlerini kapsar. Veri tabanlarında zaten mevcut örüntülerin otomatik olarak elde edilmesi sonucunda kullanılabilir modeller elde edilir. Bu modeller, karar vericiler ve mühendisler tarafından işletmenin performansını artırmak için doğrudan kullanılabilir.

Sayısal ortamda her tipte verinin sürekli ve artan şekilde depolanması sonucu yapısal olmayan verilerin analizi gerekli hale gelmiştir. Mühendis ve yöneticilerin bu tür yığın veriyi anlamaları için analiz etmeleri gerekir. Günümüzde, dünyada rekabet üstünlüğü elde etmek için kullanılan yapısal olmayan verinin analizi için geleneksel

veri analiz yöntemleri yetersiz kalır. Veri tabanlarında bilgi keşfi süreci içerisinde verinin bütününe döküman analiz algoritmaları kullanılarak değerlendirilmesi gerekir.

Stratejik kararların verildiği üst düzey toplantılarda tutulan tutanaklar, toplantılarda görüşülen konuların genel bir çerçevesini içermektedir. Yöneticiler tek bir toplantı sonucunda birtakım kararlar vererek harekete geçerler. Biriken tutanaklar genel olarak içerinde yöneticilerin de fark etmediği gizli ve değerli bilgileri elde etmek üzere değerlendirilmesiyle, daha sonraki stratejik toplantılara bir çerçeve geliştirilebilecektir. Böylece yöneticiler zaman kazanırken, uzun vadede toplantı kalitesi artmış olacaktır.

İmalat firmalarında son yıllarda artan metin dökümanlarının hacmi dolayısıyla, özellikle doğal dilde bu dökümanları işlemenin zorluğunu beraberinde getirmiştir. Ancak, yapısal olmayan bu büyük miktarlardaki veri tiplerinin analizi çok karmaşık teknikleri kullanmayı gerektirmektedir. Doğal dil işleme gibi farklı bilgisayar disiplinleri ile ortak araştırma yapmayı gerektiren TMnin imalatta kullanımı son birkaç yıldır yaygınlaşmaya başlamıştır. Türkiye'de ise imalat sektöründe bu alanda çalışma neredeyse yoktur. DM uygulamalarında, yapısal olmayan veriden anahtar kelimelerin elde edilmesi güçlü tahmin edicilerdir. TM bu anahtar kelimelerin çıkarımını yapmada kullanıldığında, model performansı artar. Yapısal olmayan metin, tek tip anket formu sonuçlarından çok daha açıklayıcıdır [1]. Anahtar kelimeler, bir dökümanın içeriğini temsil eder. İdeal olarak, bir dökümanın gerekli içeriğinden yoğunlaştırılmış anahtar kelimeleri temsil eder. Anahtar kelimeler, tanımlaması, değiştirilmesi, hatırlanması ve paylaşılması kolay olduğu için, genelde, Bilgi Geri Kazanım (Information Retrieval, IR) içinde

sorguları tanımlamada kullanılır. Matematiksel işaretlerin aksine, herhangi bir yapıdan bağımsızdır ve çoklu yapılara ve IR sistemlerine uygulanabilirler [2].

2. LİTERATÜR ÖZETİ (LITERATURE REVIEW)

İmalat firmalarında DM uygulamaları uzun süredir çalışılmakta olan güncel bir konudur [3-10]. Harding ve diğerleri (2006)'da ve Wang 2007'de DM'nin imalatta uygulamalarını araştırmıştır [11,12]. 2010 ve 2012 yıllarında, Çiflikli ve Kahya Özyirmidokuz, yine Kayseri'de bir fabrikasından topladıkları binlerce veri içinde gizli bilgilerin çıkarımını yapmışlar, yöneticilerin kullanmaları için karar ağacı modellerini elde etmişlerdir [5, 13]. Bu araştırmamızda ise, veri boyut indirgeme için bu teknikler yerine anahtar kelime çıkarımı yapılması yeterli olmuştur. Ayrıca, dökümanlar kesiklendirilmeden, doğrudan serbest metin halinde analize sokulmuştur. Dünyada son birkaç yıldır iş dünyasında TM tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmaya yeni yeni başlamıştır [14-17]. TM ile ilgili üretim işletmelerinde de araştırmalar mevcuttur [18,19].

Son zamanlarda TM işletmeler için önemli bir araştırma alanı olmuştur [16]. Chang vd. internet ve e-ticaret müşterilerinin davranışlarını doğru şekillendirmek için veri ambarları ve veri madenciliği teknolojilerini kullanmışlardır [20]. Gamon, müşteri geri bildirim verilerinin otomatik sentimatik sınıflandırmasının yapılabileceğini belirterek, doğal dil işleme ve lineer destek vektör makinalarını sınıflandırma doğruluklarını yükseltmek için kullanmıştır [21]. Gamon vd., çalışmalarında serbest müşteri geri dönüşüm metinlerinin başlıklarını ve sentiment oryantasyonu yapan bir prototip sistem sunmuşlardır [22]. Ittoo vd., online ürün özelleştirmedeki kararlarını vermede bir metin madenciliği temelli öneri sistemi sunmuşlardır [23]. Coussement ve Van den Poel, çalışmalarında otomatik bir e-mail sınıflandırma sistemi geliştirmişlerdir [24]. Weng ve Liu, çok yönlü e-mailleri başlıklarına göre düzenleyen bir şablon önermişlerdir [25]. Özyurt ve Köse, çevrim içi görüşmelerin özelliklerini belirlemek üzere makine öğrenme ve veri madenciliği metodlarını kullanmışlardır [26]. Thorleuchter vd., yeni ve işe yarar fikirleri çıkarmak için yapısal olmayan metinlerden fikir analizi yapmışlardır [1]. Tsai ve Kwee, yeniliklerin analizinin uygunluğunu ve performansını veri tabanı optimizasyonu ile

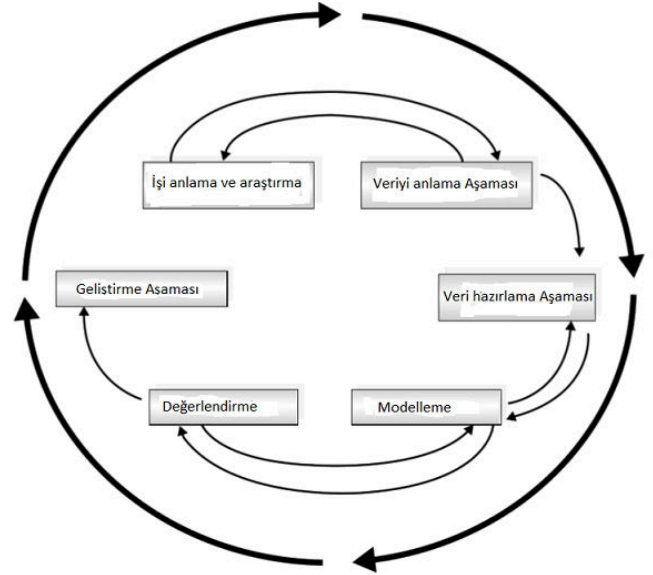
yapmıştır [27]. Gopal vd., verinin ve metin madenciliğinin durumunu özetlemiştir [28]. Sunikka ve Bragge, araştırmaların kişiselleştirmek ve uyarılma için metin madenciliği yaklaşımını geleneksel literatür taraması ile kombine etmiştir [29]. Onishi ve Manchanda, Japon sinema kategorisinde yeni ürün ve reklam satış sonuçlarını analiz etmiştir [30]. Armentano vd., metin analizinde farklı profil stratejilerinin etkilerini kullanıcıların rollerini de dikkate alarak belirlemiştir [31]. Thorleuchter ve Van den Poel, e-ticaret firmalarının web sitelerinden alınan metinsel bilgilerin ticari başarıları üzerine etkilerini analiz etmişlerdir [32]. Thorleuchter vd., web metin madenciliğini kullanarak bir Alman şirketinin müşterilerini analiz etmişlerdir [33]. Ur-Rahman ve Harding, metinsel verileri iki farklı sınıfa ayırmak için metin madenciliği ve metinsel veri madenciliğinin hibrid uygulamalarına yoğunlaşmışlardır [34]. Hao, doküman sınıflamada k-medoids ve k-medoids sosyal evrimsel programlama algoritmalarını karşılaştırmıştır [35]. He vd., üç büyük pizza zincirinin facebook ve twitter sitelerindeki yapısal olmayan metin içeriklerine metin madenciliği uygulamışlardır [36]. Kahya Özyirmidokuz, Türkiye'de online alışveriş sitelerini metin madenciliğininde doğal dil işleme kullanarak analiz etmiştir [37]. Kahya Özyirmidokuz ve Özyirmidokuz, web metin madenciliği ile Türkiye'deki en iyi yedi ısıtma sistemi firmalarının müşteri şikayet dökümanlarını analiz etmişlerdir [17]. Ordenes vd., dilsel tabanlı metin madenciliği modelini geliştirme ve iyileştirme prosesini modellemek için kullanmışlardır [38]. Stray vd. bu günlük toplantılarla ilgili çalışmalar yapmışlardır [39]. Kim vd., çalışmalarında internette farklı platform ziyaretçilerinden toplanan büyük verileri analiz etmişlerdir [40]. Hussain ve Suryani metinsel dökümanlardaki semantik benzerlikleri en yakın komşu algoritması ile belirleyerek intihalleri tespit eden bir çalışma önermişlerdir [41]. Zhang ve Chow, döküman analizinde hybrid döküman benzerliğini kullanan bir multi-seviyeli eşleştirme metodu sunmuşlardır. Çalışmada dökümanlar döküman ve paragraf seviyelerini içeren bir yapı sözkonusudur [42].

3. GENEL KAVRAMLAR (GENERAL CONCEPTS)

3.1. Metin Madenciliği (Text Mining)

DM tam olarak yapısal verileri analiz eden yöntemleri kapsar. Fakat bilgisayar ortamındaki büyük verinin %80'i metin tipindedir. Bu durum, yapısal olmayan verilerin analizini bir zorunluluk haline getirmektedir. Çok karmaşık bir süreç olan TM, yapısal olmayan verilerden anlamlı örüntüler bulmak için DM'den daha farklı veri analiz teknikleri kullanır. TM, içeriklerinin ve konularının çıkarımını yapma ve yapılaşdırma, hızlı analiz yapma, gizli verinin keşfi ve otomatik karar verme amaçlarıyla, bilgisayar ortamındaki büyük miktarlarda doğal dildeki metin verilerinin çeşitli tekniklerle otomatik işlenmesidir.

TM, çalışmanın tarihini veya yazarını belirlemede kullanılan metinlerin stillerini çalışan stylometriden farklıdır. Ancak, TM çok boyutlu istatistiğin gelişmiş yöntemlerini kullanarak, dilsel istatistik veya nicel dilsel yöntemler olarak adlandırılan lexicometri veya lexical istatistiğin bir uzantısıdır [44]. Şekil 1'de sunulan ve 1996 yılında DaimlerChrysler, SPSS ve NCR firmalarını temsil eden analistler tarafından geliştirilmiş bir DM süreci olan CRISP-DM (Cross Industry Standard Process for Data Mining), DM için Çapraz Endüstri Standardı Süreci metodolojisi, araştırmamızı sistematik bir çerçevede yapmak için kullanılmıştır [45]. Araştırmada CRISP-DM iş süreci, araştırma sorusuna çözüm bulmak üzere kullanılmıştır. Bu süreç içerisinde, kalitatif verilerin analizleri yapılmıştır. CRISP-DM, yapısal bir bilgi keşfi süreci yaklaşımıdır ve araştırmamızın analiz sıralarını adımlar. Bu yaklaşım, veri analiz sürecini daha hızlı, gerçekçi, daha yönetilebilir ve az maliyetli yapar [46].



Şekil 1. CRISP-DM Prosesi (Process of Crisp-DM) [45]

Metin dijital platformda yazılır. Mevcut metnin büyüklüğü artmaya devam etmektedir. Klasik veri madenciliği teknikleri yapısal olmayan verinin analizi için elverişli değildir. Bu nedenle bazı dilsel yaklaşımlardan faydalanmamız gerekir. Metin madenciliği teknikleri metni nümerik sayılara dönüştürerek istatistik ve makine öğrenimi dahil birçok veri madenciliği algoritmasının uygulanabilmesine hazır hale getirir. İşletmeler veri madenciliği ve metin madenciliğini rekabet üstünlüğü sağlayabilmek için müşterileri, rakipleri başta olmak üzere çevrelerini analiz etmek için kullanırlar.

Şekil 1 metin madenciliği sürecini göstermektedir. Veri toplamadan sonraki adım doğal dil işleme algoritmalarını kullanarak veriyi nümerik indislere dönüştürmektir. Bu aşamada, veri parçalara ayrılır, cümleler belirlenir, kelimeler seçilir, gereksiz kelimeler temizlenir, kelime kökleri tespit edilir. Bu adım varlıkları belirlemek için kelimelerin çıkarımını, dur-kelimelerin kaldırılmasını ve imla denetimi yapmayı içerir. Belgelerden sözcük çıkarmaya ek olarak, tarih, yazar, cinsiyet, kategori vb. gibi metinle ilişkili değişkenler elde edilir. Ayırıştırmanın ardından en önemli görev metin dönüşümüdür. Bu adım, latent semantik analiz (LSA), gizli semantik endeksleme (LSI) ve vektör uzay modeli gibi doğrusal cebir tabanlı yöntemleri kullanarak metnin sayısal gösterimi ile ilgilidir. Bu alıştırma, bir belge terimi matrisinin (bir elektronik tablo veya metinsel verinin düz benzeri sayısal gösterimi) oluşturulmasıyla olur. Matrisin boyutları, belge sayısı ve koleksiyondaki terimlerin sayısına göre belirlenir. Bu adım, tekil değer ayrıştırması (SVD) kullanılarak belge başına matrisin boyut azaltılması içerebilir. Binlerce belgeden oluşan bir derleme sonucunda büyük

olasılıkla belgeleri birbirinden ayırmakla ya da belgeleri özetlemekle alakasız birçok terim elde edilecektir. Alakasız terimleri ortadan kaldırmak için terimleri manuel olarak taramak gerekir. Bu genellikle tüm TM adımlarında en çok zaman alan ve öznel görevlerden biridir ve alan uzmanlığı gerektirir.

Terim filtrelemeye ek olarak, analizle ilgisiz dökümanlar anahtar kelimeler kullanılarak aranır. Tarih, kategori vb. gibi diğer doküman değişkenlerinden birine dayanan veya bazı terimleri içermeyen dökümanlar filtrelendirir. Terim filtreleme veya doküman filtreleme, terim tabanlı doküman matrisini değiştirir. Terim tabanlı doküman matrisi terimin dökümanlarda bulunma sıklığını içerir. Belge-terimi matrisi her hücre için bir değer olarak bir doküman içindeki terimlerin varlığına göre bir dökümanda terimin ortaya çıkma sıklığını içerir. Bu sıklık matrisinden, çeşitli terim ağırlıklandırma teknikleri kullanılarak bir matris oluşturulur. TM adımı, kümeleme, sınıflandırma, ilişki analizi ve bağlantı (link) analizi gibi geleneksel veri madenciliği algoritmalarının uygulanmasını içerir. TM, farklı ayarları kullanarak analizin tekrar edilmesini ve daha iyi sonuçlar elde etmek için terimlerin dahil edilmesini veya hariç tutulmasını içeren, tekrar eden bir süreçtir. Bu adımın sonucu, doküman grupları, tek veya çok terimli başlıklar veya bir sınıflandırma probleminin cevabı olan kurallar olabilir [45].

Bu çalışmada kullanılan döküman işleme teknikleri aşağıda verilmiştir [48]

- Kelimelere Ayırma (Tokenization): Yapısal olmayan veriyi cümlelere, daha sonra da kelimelere parçalama işlemidir. Elde edilen belirteçleri bir dizin içine alarak tokenları elde etme işlemidir. Burada noktalama işaretlerini, sayı ve diğer sembolleri doğru ve tutarlı işleme oldukça önemlidir.

- Küçük Harfe Dönüştürme (Downcasing): Bütün kelimeler araştırmayı kolaylaştırmak için küçük harfe dönüştürülür.

- Köklerine İndirme (Stemming): Kelimeleri eklerinden ayırarak kök kelime haline getirmek.

- Filtreleme (Stopword removal): Ve/veya gibi her türlü gereksiz kelimelerin çıkarılması işlemidir. Doğal dil işleme süreci içerisinde aslında elde edilen indekslerde filtreleme işlemleri yapılsa da

son zamanlarda bazı algoritmalar probleme göre filtreleme işlemlerini ihmal etmektedir.

- Eş anlamlı Genişleme (Synonym expansion): Her bir simge için, eş anlamlılar bir eş anlamlılar listesinde aranır ve dizine eklenir. Eş anlamlılar listesindeki güncellemeler, sorguyu yeniden endekslemek zorunda kalmadan dinamik olarak hesaplanabildiğinden, genellikle dizin terimleri yerine sorgu terimlerinde yapılır. Bu çalışmada eş anlamlı genişleme kullanılmamıştır.

Metinlere yukarıda bahsedilen ön işleme algoritmaları uygulandıktan sonra elde edilen numerik veri kalıbına herhangi bir geleneksel istatistiksel ya da tahmin modeli ya da DM algoritması uygulanabilir [45]. Dolayısıyla modelleme aşamasına geçebilmek için yapısal olmayan veri numerik indislere dönüştürülmelidir.

3.2. Doğal Dil İşleme (Natural Language Processing)

Veri doğal dil işleme (NLP) teknikleri ile işlenirken TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency; Terim Frekansı-Ters Döküman Frekansı) yöntemi kullanılmıştır. Veri doküman koleksiyonuna dönüştürülmesini sağlayan TF-IDF, bir kelimenin döküman içinde önemini ölçen nümerik bir istatistiktir. Formül 1, 2 ve 3'de gösterilmektedir.

$$tf \cdot idf(t, d) = tf(t, d) \cdot idf(t) \quad (1)$$

$$tf(t, d) = \sum_{i \in d}^{|d|} 1\{d_i = t\} \quad (2)$$

$$idf(t) = \log \left(\frac{D}{\sum_{d \in D} 1\{t \in d\}} \right) \quad (3)$$

TF-IDF yöntemi sonucunda çok miktarda kelime ve parametre ortaya çıkar. Bu istenmeyen durum, budama (prune) algoritması kullanılarak önlenir. Bu araştırmada, bu aşamada, budama yöntemi olarak yüzde miktar yöntemi tercih edilmiştir. Dökümanların %70'inden daha azında ortaya çıkan kelimeler budanmıştır.

NLP sürecinde veri analizine tokenization (kelimelere ayırma) ile kesiklendirerek başlanmıştır. Tokenization, metin verisini anlamlı parçalara bölme işlemidir. Harf olmayan ve harflerden oluşan veriler için ayrı ayrı tokenization işlemi uygulanmıştır. Daha sonra Porter stemming algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma, kelimelerin köklerini elde etmeye yardımcı olur. Elde edilen dökümanlara filtreleme işlemleri uygulanmıştır. Öncelikle 2 karakterden küçük ve

25 karakterden büyük olan tüm kelimeler de dökümanlardan çıkarılması için uzunluk filtreleme yapılmıştır. Ayrıca, dökümanlardaki tüm durkelimeleri (and, the, because, although, gibi) verilerden kaldırılmıştır. Önemli bu kelimelerin kaldırılması sonucunda, analizler daha hızlı ve kolay olacaktır. Ayrıca n-grams algoritması kelime gruplarını seçmek ve analizlere kelimeleri grup halinde dahil edebilmek için uygulanmıştır. Böylece, gruplardan oluşan bu kelimeler birlikte değerlendirilebilecektir.

3.3. Benzerlik Temelli Modelleme (Similarity Based Modelling)

Benzerlik temelli model elemanlara ait dilsel simgeler veya n-gram'lar gibi bir dağılım oluşturmaya ve sorgulanan örneğe en yakın dağılım ile dili belirlemek için bir benzerlik ölçüsü kullanmaya dayanır. Sınıflandırma yaklaşımı, dil için yüksek sayıda geniş örnekler ihtiyacı duyarken, benzerlik yaklaşımı tek bir dilde birleştirilmiş tüm metin gibi dil için tek bir geniş örneğe dayanır. Bu model, özünde k-en yakın komşuluk modelidir. Dil başına bir büyük metin olması bize, dilin doğru dağılımına en yakın simgelerin veya n-gram'ların dağılımının çıkarımlarını yapma imkanı verir [47]. Benzerlik temelli yaklaşım bir dilin profili gibi n-gram karakterlerin dağılımını hesaplayarak ve sorgu metinlerinin profili ile bu profili karşılaştırmada kullanarak bir dile ait tüm cümleleri tek bir metinde birleştirir. Bu şekilde, bir dil profilinde bir modelin en özlü temsilinin o dilin modeli olduğu ve sınıflandırma sürecinin sadece benzerlik hesaplaması olduğu anlaşılır. Benzerlik temelli yaklaşım daha hızlı bir analiz, ve daha sonraki bir karşılaştırma için kalıcı bir profil sağlar. Buna ek olarak, n-gram ile profili oluşturmak yeni veri ile artan güncelleme olanağı sağlar [47].

Bu araştırmanın önışleme sürecinde veriyi seçmek ve indirgemek için benzerlik temelli modelleme kullanılmıştır. Dökümanlar arasındaki benzerlikler ortaya çıkmıştır. Araştırmada Euclidian benzerliği uygulanmıştır. Eşitlik (4)'de verilen Cosine benzerlik ölçüsü en sık kullanılan benzerlik ölçülerindedir [16]:

$$Sim(X_i, X_j) = (X_i \cdot X_j) = \sum_k X_{ik} X_{jk} \quad (4)$$

Eşitlik (4)'de, x' , $x = xx'$ 'in normalleştirilmiş vektörüdür.

Cosine ölçüsü, metin gruplandırma, iki vektör arasındaki açının cosinesini alan popüler bir

ölçüdür ve benzerliğin anlaşılmasında değişmez bir ölçü yakalar. Cosine benzerliği vektörlerin uzunluğuna dayanmaz, sadece yönüyle ilgilenir. Bu dökümanlara terimlerin aynı görelî dağılım ile işlem görmesini sağlar. Dökümanların boyutuna duyarsız olması da metinlerin analizinde çok popüler bir ölçü olmasının bir sebebidir. Ayrıca bu özelliği ile daha etkin bir önışleme için döküman vektörleri birim kürelere normalize edilebilir [49].

4. TOPLANTI TUTANAKLARININ ANALİZİ (ANALYSIS OF MEETING REPORTS)

Çalışmanın yapıldığı firma, ülkemizde hatırı sayılır kablo firmalarından birisidir. Firma elde ettiği başarı ve üstün performansı ile dünya sıralamalarına girmiştir.

1970 yıllarda enerji kabloları üretmek üzere kurulan firma, hızlı bir gelişme süreciyle zaman içerisinde yüksek gerilim enerji kablosu, bakır haberleşme kablosu, enerji kablosu, fiber optik kablo, alüminyum iletken ve emaye bobin teli üretimi ile tel ve kablo sektöründe çok geniş bir ürün portföyü oluşturmuştur.

Firma her türlü toplantılarını metin formatında kaydetmektedir. 2009-2015 her sene sonunda yapılmış 57 adet toplantıya ait tutanaktan tahminleme yapılmaktadır. Yöntem olarak, dökümanlara metin madenciliği süreci içerisinde, otomatik doğal dil işleme teknikleri kullanılmıştır. Otomatik analizlerin yanı sıra elde edilen yapısal veri tarafımızdan elle kontrol edilerek yeniden gözden geçirilmiştir. K-ortalamlar ve benzerlik temelli modelleme araçları, sosyal ağ grafikleri verilere uygulanmıştır.

Firmadan temin edilen toplantı dökümanları doğal dil işleme algoritmalarıyla ön işleme tamamlanarak modelleme aşamasına hazır hale getirebilmek için vektör matrislere dönüştürülmüş yapısal olmayan verilerden nümerik sonuçlar otomatik olarak elde edilmiştir.

Ön işleme aşamasında öncelikle dökümanlar içerisindeki veriler ayrı ayrı tokenization işlemi ile parçalanmıştır. Sonra tüm kelimeler büyük harfe dönüştürülmüştür. Türkçe dökümanları işleyebilmek için Snowball'un Turkish stemming algoritması kullanılmıştır. Böylece, kelimelerin kökleri elde edilmiştir. 220 adet Türkçe dur kelimesi dökümanlardan çıkarılmıştır. Bu çalışmalar için PolyAnalyst ve RapidMiner programı içerisindeki ilgili algoritmalar kullanılmıştır.

5. BULGULAR (FINDINGS)

Dökümanların TF-IDF kullanılarak doğal dil işleme algoritmaları uygulanması sonucunda dökümanlara ait ortak kelime matrisinin ilk 25 kelimesi Tablo 1’de gösterilmektedir.

Tablo 1. Ortak kelime matrisi (Common word matrix)

	word	attribute name	total occurences
1	üret	üret	297
2	hedef	hedef	218
3	kablo	kablo	203
4	bak	bak	175
5	iç	iç	169
6	yap	yap	167
7	yetersiz	yetersiz	166
8	gerçek	gerçek	143
9	enerji	enerji	139
10	çal	çal	132
11	yönet	yönet	129
12	saat	saat	122
13	tesis	tesis	112
14	çevre	çevre	109
15	güven	güven	108
16	içeri	içeri	102
17	genel	genel	100
18	oran	oran	99
19	süre	süre	96
20	hes	hes	95
21	miktar	miktar	90
22	ol	ol	88
23	sistem	sistem	86
24	şikayet	şikayet	84
25	haber	haber	83

Tablo 2. Kelime sıklığı tablosu (Vocabulary frequency table)

Kelime	Sıklık (%)
Kapasite	42.86
Memnunum	14.29
Şirketimden	14.29

Şehir	14.29
Raporla	14.29
Akredite	14.29
Mevcuttur	14.29
Besleyen	14.29
Hava	14.29
Enerjide	14.29
Kondensto	14.29
Ortalama	14.29
İlave	14.29
kondenstop	14.29
Kwh	14.29
Verimi	14.29
Yanma	14.29
projesinde	14.29
Şikayetinden	14.29
Sevk	14.29
barkoda	14.29
barkodu	14.29
Sistemde	14.29
Ambalajlama	14.29
Etiketlerdeki	14.29
Metrajlama	14.29
sorunlar	14.29
Malzemeden	14.29
8 TOP	14.29
bilgilendirmelerin	14.29
panolar	14.29
İlan	14.29
Politika	14.29
Ohsas	14.29
enetegre	14.29
Sahip	14.29
belgelendirmesi	14.29
denetiminde	14.29
İzoleli	14.29
izoleleli	14.29
Tambur	14.29
makinelerinin	14.29
Kafes	14.29
Telli	14.29
kapasiteye	14.29

Her kelimeye ait istatistiksel hesaplar da otomatik olarak yapılabilmektedir. Dökümanlara k-en yakın komşuluk gruplandırma uygulanmıştır. Dökümanlar 2 gruba ayrılmıştır. Bir grupta 25, diğerinde 32 doküman vardır. Dökümanlara ait gruplandırma grafiği Şekil 2’de verilmektedir. Gruplar incelendiğinde, aynı gruptaki dökümanlardan benzer kararlar çıktığı kolaylıkla anlaşılabilmektedir.

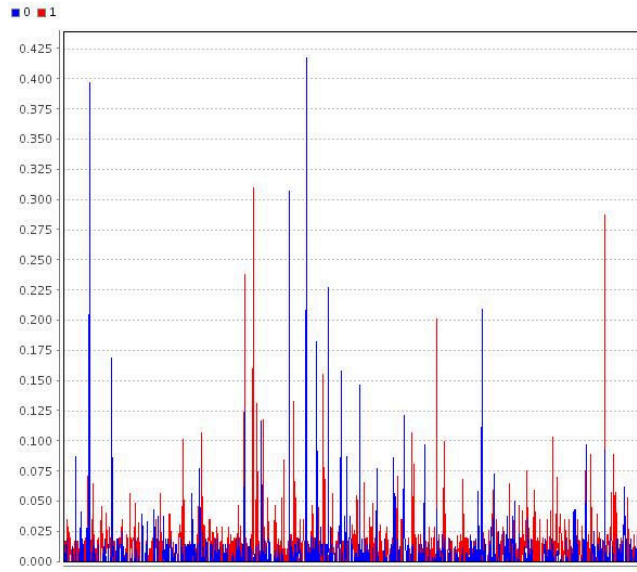
Dökümanlar, otomatik olarak içerik olarak 2 gruba ayrılrsa da, dökümanlarda yazılı kelimeler bazında dökümanlar yeniden gruplandırılarak benzer kelimeler gruplara ayrılması sağlanmıştır. Doğal dil işleme algoritmaları uygulanan dökümanların

önışlemesi tamamlanarak dökümanlara ait elde edilen ortak kelime vektörü elde edilmiştir. Daha sonra kelime vektörlerinin benzerlik modelleme ile gruplandırılarak 5 adet anahtar grup başka bir ifade ile tema elde edilmiştir.

Elde edilen bu temalar şu şekilde isimlendirilmiştir:

1. Metrajlama
2. Enerji
3. Kapasite
4. Lojistik
5. Süreç

Bu gruplar/temalar arasındaki ilişkileri tespit etmek için ağ grafikleri kullanılmıştır. Elde edilen temalar arası mesafeler benzerlik analizleri ölçülmüştür. Cosine benzerlik analizlerinde Mixed Measures ölçümleri ve mixed Euclidian Distance ölçüm parametresi kullanılmıştır.



Şekil 2. Sınıflandırma sonucu elde edilen plot grafik (Plot of classification result)

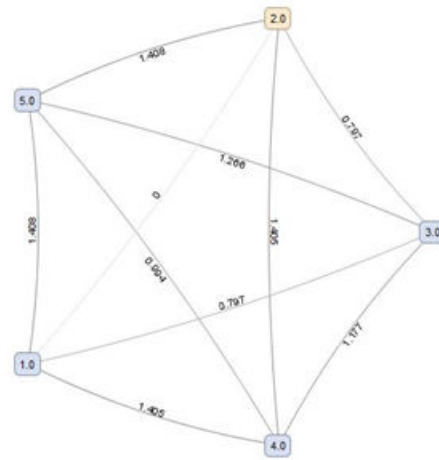
Aşağıdaki Tablo 3’de bu temaların birbirlerine benzerlik oranları verilmektedir.

Tablo 3. Kelimelerin benzerliğini ifade eden uzaklık değerleri (Distance values expressing the similarity of the terms)

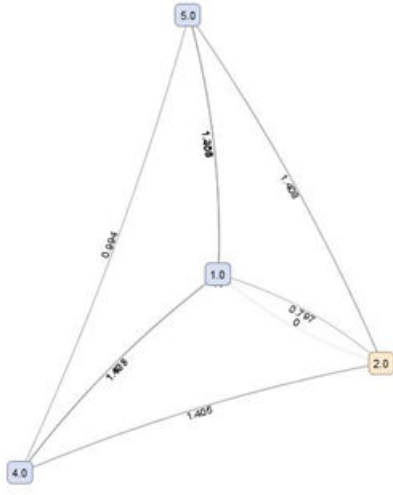
first	second	similarity distance
1	2	1,47
1	3	0,796815
1	4	1,405495

1	5	1,408278
2	3	0,796815
2	4	1,405495
2	5	1,408278
3	4	1,176727
3	5	1,266015
4	5	0,994268

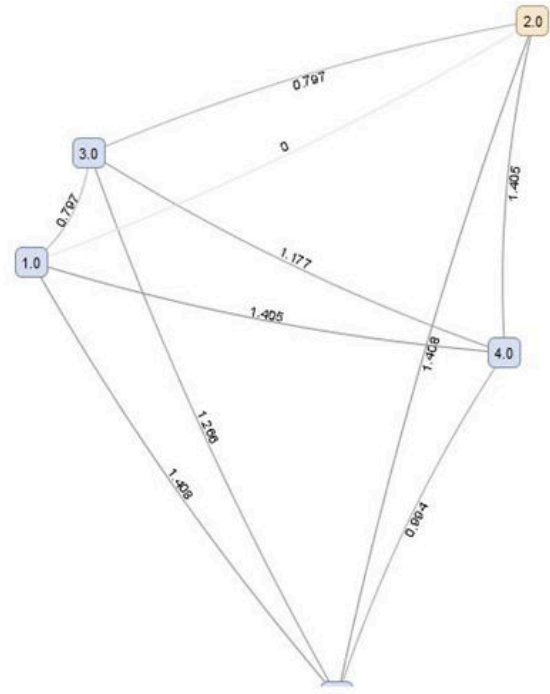
Doğal dil işleme teknikleri ile önışlemesi tamamlanan dökümanlara Cosine benzerlik ağ analizi uygulanması sonucu temalara ait sosyal ağ grafikleri elde edilmiştir. Şekillerde gösterilen ağ grafikleri birbirlerinin aynısı olup, farklı tarz gösterimleri sergilemektedir. Elde edilen ağ grafiğinden, toplantılara ait temaların birbirleriyle olan ilişkisi sayısal olarak ifade edilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı gibi, 1 nolu tema ve 2 nolu tema arasında en az benzerlik vardır. 2 nolu ve 4 nolu temalar ise yüksek benzerlik gösterirler. Bu temalar değerlendirildiğinde ve bu tema başlıkları altına düşen kelimeler neredeyse aynıdır.



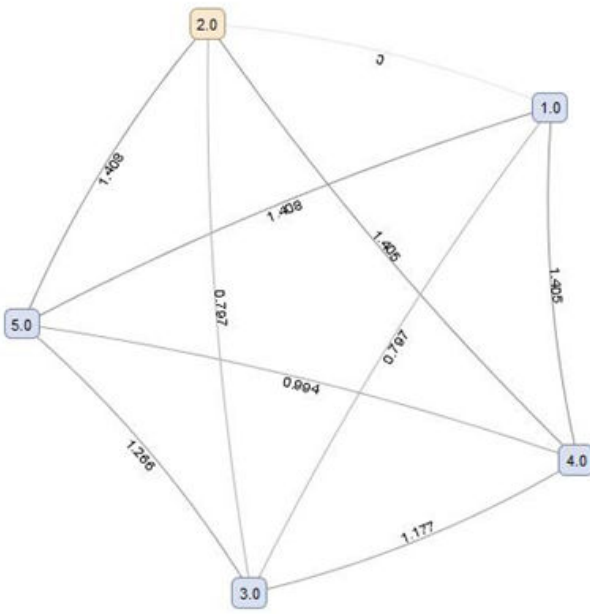
Şekil 3. Kelimelerin ilişkilerini gösteren uzaklık değerleri (Distance values indicating the relations of the terms)



Şekil 4. Kelimelerin ilişkilerini gösteren uzaklık değerleri
(Distance values indicating the relations of the terms)

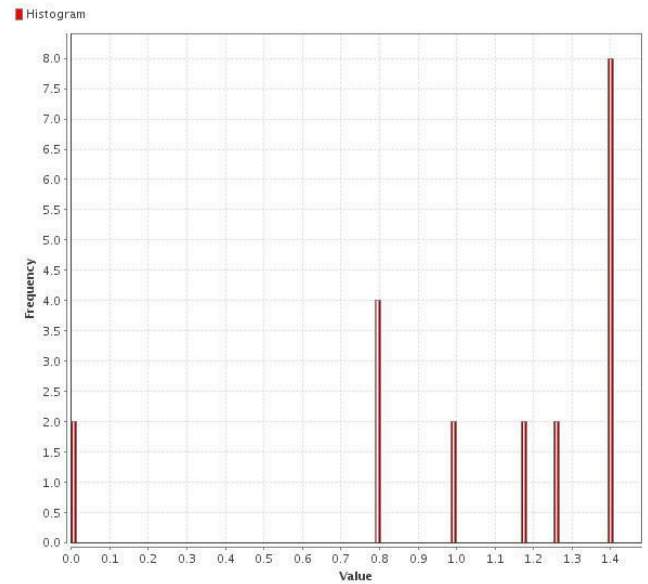


Şekil 6. Kelimelerin ilişkilerini gösteren uzaklık değerleri
(Distance values indicating the relations of the terms)



Şekil 5. Kelimelerin ilişkilerini gösteren uzaklık değerleri
(Distance values indicating the relations of the terms)

Şekil 7'de gruplara ait benzerlik histogramı verilmektedir. Temaların sıklık değişimi görülmektedir.



Şekil 7. Temalara ait sıklık değişim histogramı (Temporal frequency change histogram)

6. TARTIŞMA VE SONUÇLAR (CONCLUSION AND RESULTS)

Bu araştırmada, Kayseri'de bir imalat fabrikasında kalite kontrol dökümanlarından bilgi çıkarımı yapılmıştır. Yapısal olmayan 57 döküman analiz edilmiştir. Kelime vektörü ve dökümanlardan toplantı temaları elde edilmiştir (Anahtar kelime matrisi elde edilmiştir). Böylece, dökümanlar gruplandırılmıştır.

Toplantılarda tutulan tutanak dökümanlarına kelimelere ayırma (tokenization), harf dönüştürme (transform cases), dur-kelimelerini filtreleme ve kök bulma (stemming) gibi doğal dil işleme teknikleri uygulanmıştır. TD-IDF (Terim Frekansı- Ters Belge Frekansı) önışleme analiz tekniği kullanılmıştır. Böylece dökümanlar sayısal matrislere dönüştürülerek, modelleme sürecine hazır hale getirilmiştir. Modelleme aşamasında gruplandırma ve sosyal ağ analizi yapılmıştır.

Araştırmada, toplantı tutanaklarından kelime çıkarımı yapılmış, toplantılara ait genel konu başlıkları metin madenciliği ile tespit edilmiştir. Bu başlıkların özellikle ilk üçü olan Metrajlama, Enerji ve Kapasite konularının toplantılarda vurgulandığı görülmektedir. Yöneticiler çeşitli madenleme teknikleriyle gruplanmış bu konu başlıklarına göre değerlendirme yaparak sonraki toplantıların kalitesini artırarak zaman kazanabilir. Gelecekte yapılacak araştırmalarda, daha kapsamlı ve büyük miktarda veriler kullanılabilir. Tematik analiz gibi kalitatif araştırma tekniklerinden faydalanılabilir. Alternatif TM yöntemleri çalışılabilir. Makine öğrenimi ve yapay zeka teknikleri ile güçlü modeller geliştirilebilir. Elde edilen temalar, ilerde tasarlanacak bilgi sistemlerinde girdi olarak kullanılabilir.

EKBILGI (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir. Proje no: FBA-2014-4850.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] D. Thorleuchter, D. V. Den Poel ve A. Prinzie, (2010). "Mining ideas from textual information," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 7182–7188.
- [2] S. Rose, D. Engel, N. Cramer ve W. Cowley, (2010), "Automatic keyword extraction from individual documents", in: M.W. BERRY and J. KOGAN (Ed.), *TM: Applications and Theory*, Wiley, p.3-19.
- [3] S. Kumar, A. Nassehi, S. T. Newman ve M. K. Tiwari, M. K., (2007), "Process control in CNC manufacturing for discrete components: A STEP-NC compliant framework", *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 23, pp.667-676.
- [4] D.C. Li ve C.W. Yeh, (2008), "A non-parametric learning algorithm for small manufacturing data sets", *Expert Systems with Applications*, 34, pp.391– 398.
- [5] C. Çiflikli ve E. Kahya-Özyirmidokuz, (2010), "Implementing A Data Mining Solution For Enhancing Carpet Manufacturing Productivity", *Knowledge Based Systems*, 23 (8) Pp.783-788.
- [6] S. Gebus ve K. Leiviska, (2009), "Knowledge acquisition for decision support systems on an electronic assembly line", *Expert Systems with Applications*, 36 (1), pp. 93-101.
- [7] A. Kusiak ve M. Smith, (2007), "Data mining in design of products and production systems", *Annual Reviews in Control*, 31, pp.147–156.
- [8] P. Kang, H. Lee, S. Cho, D. Kim, J. Park, J. K., Park ve S. Doh, (2009), "A virtual metrology system for semiconductor manufacturing", *Expert Systems with Applications*, 36, pp.12554–12561.
- [9] O. Durán, N. Rodriguez ve L.A. Consalter, (2010), "Collaborative particle swarm optimization with a data mining technique for manufacturing cell design", *Expert Systems with Applications*, 37, pp.1563–1567.
- [10] S. H. Liao, P. H. Chu ve P. Y. Hsiao, (2012), "Data mining techniques and applications – A decade review from 2000 to 2011", *Expert Systems with Applications*, 39, pp.11303–11311.
- [11] J.A., Harding, M. Shahbaz, Srinivas ve A. Kusiak, (2006), "Data mining in manufacturing: A review", *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Manufacturing Engineering Division of Asme 128, pp. 969- 976.
- [12] K. Wang, (2007), "Applying data mining to manufacturing: the nature and implications", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 18 pp.487–495.
- [13] C.Çiflikli ve E. Kahya-Özyirmidokuz, (2012), "Enhancing Product Quality Of a Process", *Industrial Management and Data Systems*, 112, pp.1181-1200.
- [14] A. Ittoo ve G. Bouma, (2013), "Term extraction from sparse, ungrammatical

- domain-specific documents”, *Expert Systems with Applications*, 40, pp.2530–2540.
- [15] D. Thorleuchter ve D. Van Den Poel, (2014), “Semantic compared cross impact analysis”, *Expert Systems with Applications* 41, pp. 3477– 3483.
- [16] E. Kahya-Özyirmidokuz, (2014), “Analyzing Social Network Unstructured Data”, *Information Development*, doi: 10.1177/0266666914528523.
- [17] E. Kahya Özyirmidokuz ve M. H. Özyirmidokuz, (2014) “Analyzing Customer Complaints : A Web Text Mining Application”, in International Conference on Education and Social Sciences (INTCESS14), Ferit USLU (Ed.), İstanbul, 3-5 February 2014, pp.734-743.
- [18] Y. Liu, W. F. Lu ve H. T. Loh, (2006), “A Framework of information and knowledge management for product design and development: A text mining approach”, Information Control Problems in Manufacturing IFAC 12th, in INCOM 2006, Information control problems in manufacturing, pp. 635-640.
- [19] A. Negahban ve J. S. Smith, (2014), “Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis”, *Journal of Manufacturing Systems*, 33 (2), pp.241–261.
- [20] C. W. Chang, C. T. Lin ve L.Q. Wang, (2009). “Mining the text information to optimizing the customer relationship management,” *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 1433–1443.
- [21] M.Gamon, (2004). “Sentiment classification on customer feedback data: Noisy data, large feature vectors, and the role of linguistic analysis,” in Proc. the 20th international conference on Computational Linguistics, pp. 841-847, PA, USA: Association for Computational Linguistics Stroudsburg.
- [22] M.Gamon, A. Aue, S.Corston-Oliver ve E. Ringger, (2005). “Pulse: Mining customer opinions from free text,” *LNCS*, pp. 121-132, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.
- [23] A. R. Ittoo, Y. R. Zhang ve J. Jiao, (2006). “A TM based recommendation system for customer decision making in online product customization,” in Proc. International Conference on Management of innovation and technology, vol. 1, pp. 473-477, Singapore, China: IEEE.
- [24] K.Coussement ve D. V.Den Poel, (2008). “Improving customer complaint management by automatic email classification using linguistic style features as predictors,” *Decision Support Systems*, vol. 44, pp. 870–882.
- [25] S.S.Weng ve C.K. Liu, (2004). “Using text classification and multiple concepts to answer e-mails,” *Expert Systems with Applications*, vol. 26, pp. 529–543.
- [26] Ö. Özyurt ve C. Köse, (2010). “Chatmining: Automatically determination of chat conversations’ topic in Turkish text based chat mediums,” *Expert Systems with Applications*, vol. 37, pp. 8705–8710.
- [27] S.Tsai ve A. T. Kwee, (2011). “Database optimization for novelty mining of business blogs,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 11040–11047.
- [28] R. D.Gopal, J. R.Marsden ve J. Vanthienen, (2011). “Information mining - Reflections on recent advancements and the road ahead in data, text, and media mining,” *Decision Support Systems*, vol. 51, pp. 727–731.
- [29] A.Sunikka ve J. Bragge, (2012). “Applying text-mining to personalization and customization research literature – Who, what and where?” *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 10049–10058.
- [30] H. Onishi ve P. Manchanda, (2012). “Marketing activity, blogging and sales,” *Intern. J. of Research in Marketing*, vol. 29, pp. 221–234.
- [31] M. G.Armentano, D. Godoy ve A. A. Amandi, (2013). “Followee recommendation based on text analysis of micro-blogging activity,” *Information Systems*, vol. 38, pp. 1116-1127.
- [32] D.Thorleuchter ve D.V. DenPoel, (2012). “Predictinge-commercecompany success by mining the text of its publicly-accessible website,” *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 13026–13034.
- [33] D.Thorleuchter, D. V. Den Poel ve A. Prinzie, (2012). “Analyzing existing customers’ websites to improve the

- customer acquisition process as well as the profitability prediction in B-to-B marketing,” *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 2597–2605.
- [34] N.Ur-Rahman ve J. A. Harding, (2012). “Textual DM for industrial knowledge management and text classification: A business oriented approach,” *Expert Systems with Applications*, vol. 39, pp. 4729–4739.
- [35] Z.G. Hao, (2012). “A new text clustering method based on KSEP,” *Journal of Software*, vol. 7, no. 6, pp. 1421-1425.
- [36] W. He, S. Zha ve L. Li, (2013). “Social media competitive analysis and TM: A case study in the pizza industry,” *International Journal of Information Management*, vol.33, no.3, pp. 464–472.
- [37] E. Kahya Özyirmidokuz, (2014). “Analyzing unstructured facebook social network data through web TM: A study of online shopping firms in Turkey,” *Information Development*, pp. 1–12, 2014.
- [38] F. V.Ordenes, B. Theodoulidis, J. Burton, T.Gruber ve M. Zaki, (2014). “Analyzing customer experience feedback using TM: A linguistics-based approach,” *Journal of Service Research*, pp. 1-18.
- [39] V. Stray, I.K. Dag ve T. D. Sjøberg, (2016). “The daily stand-up meeting: A grounded theory study”, *The Journal of Systems and Software* 114, 101–124.
- [40] S. H. Kim, S. Park, M. R. Sun ve J. H. Lee, (2016). “A Study of Smart Beacon-based Meeting, Incentive Trip, Convention, Exhibition and Event (MICE) Services Using Big Data”, *Procedia Computer Science* 91, 761 – 768.
- [41] S. F. Hussain ve A. Suryani, (2015). “On retrieving intelligently plagiarized documents using semantic similarity”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 45, 246–258.
- [42] H. Zhang ve T.W.S. Chow, (2012). “A multi-level matching method with hybrid similarity for document retrieval”, *Expert Systems with Applications* 39, 2710–2719.
- [43] A. Hotho, A. Nurnberger ve G. Paaß, (2005). “A Brief Survey of Text Mining. LDV Forum – GLDV”, *Journal for Computational Linguistics and Language Technology* 20(1), 19-62.
- [44] S. Tuffery, (2011), *DM and Statistics for Decision Making*. Wiley
- [45] D. T. Larose, (2005), *Discovering Knowledge in Data: An Introduction to Data Mining*, USA: Wiley.
- [46] S. Sumathi ve S.N. Sivanandam, (2006). *Introduction to DM and its Applications*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- [47] Hoffmann and Klinkenberg, 2014 *RapidMiner: Data Mining Use Cases and Business Analytics Applications*, Markus Hofmann, Ralf Klinkenberg, CRC Press, Taylor and Francis
- [48] G.S. Ingersoll, T.S. Morton ve A.L. Farris, (2013) *Taming Text: How to Find, Organize, and Manipulate it*, Liddy, L. (Ed.). NY: Manning Publications and Co
- [49] J. Ghosh ve A. Strehl, (2006). “Similarity-Based Text Clustering: A Comparative Study, in: *Grouping Multidimensional Data: Recent Advances in Clustering*”, Jacob Kogan, Charles Nicholas, Marc Teboulle (Eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 73-98.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 17-04-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.306664	
	<u>Kabul/Accepted</u> 13-11-2017		

Yaz Spor Okulu Seçiminde Bütünleşik Bir Tereddütlü-Bulanık AHP ve TOPSIS Yaklaşımı

Mustafa Batuhan Ayhan *¹

ÖZ

Yaz spor okulları özellikle ilk veya ortaokula devam eden çocuklar için yaz sezonunda önem kazanmaktadır. Bu yaz okulları ile çocuklar hem eğlenebilir hem de yeni şeyler öğrenebilirler. Kendilerine artan talep nedeniyle, yaz spor okullarının sayısı artmaktadır. Bu yüzden, en iyi yaz spor okulunu seçmek bir karar verme problemi haline gelmektedir. Dolayısıyla bu makalede, bu yeni probleme analitik bir çözüm önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda literatürde yakın zamanlarda sıkça kullanılan Tereddütlü-Bulanık AHP (HF-AHP), TOPSIS tekniği ile bütünleşik olarak kullanılmıştır. Önerilen bu modelin, uygulama örneğinde 4 ana ve 15 alt seçim kriterinin önem ağırlıkları HF-AHP ile belirlenmiştir. En iyi yaz spor okulu 3 alternatif arasından TOPSIS metodu kullanılarak seçilmiştir. Ayrıca yapılan duyarlılık analizi ile kriter ağırlıklarındaki değişimlerin verilen karar üzerindeki etkileri araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yaz Spor Okulu Seçimi, Tereddütlü Bulanık AHP, TOPSIS, Duyarlılık Analizi

An Integrated Hesitant Fuzzy AHP and TOPSIS Approach for Selecting Summer Sport School

ABSTRACT

Summer sport schools have been gaining an importance especially for the children attending to primary or secondary schools in summer seasons. By these summer schools, the children can both have entertainment and learn new things. Due to the increasing demands for them, the number of summer sport schools has increased. Hence, selecting the best summer school has become a decision making problem. Therefore, in this paper, an analytical solution was proposed for this new problem. In the proposed approach, Hesitant Fuzzy AHP (HF-AHP), which is frequently used in literature in recent times, was used as integrated with TOPSIS. In the case study part of this proposed model, the importance weights of 4 main and 15 sub-criteria were determined via HF-AHP. The best summer sport school was selected among the 3 alternatives by using TOPSIS method. Furthermore, by performing sensitivity analysis, the effects of changes in criteria weights on the decision were investigated.

Keywords: Summer Sport School Selection, Hesitant Fuzzy AHP, TOPSIS, Sensitivity Analysis

¹ Marmara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü MA 319, Tel: 0216 348 02 92-1328-
email:batuhan.ayhan@marmara.edu.tr

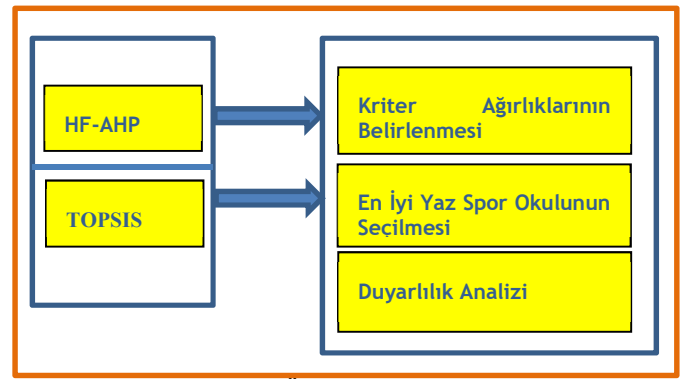
1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yaz spor okulları, şehirlerde çalışan anne ve baba oranının artması, çocukların sokakta oyun oynayamaması gibi sorunlar sebebiyle ortaya çıkmıştır. Özellikle ilk ve ortaokul çağındaki çocukların evde amaçsızca vakitlerini geçirmelerini önlemek ve eğlenerek yeni şeyler öğrenmelerini sağlamak için her yaz tatili döneminde gündeme gelmektedir. Yapılan aktiviteler ve verilen eğitimler sayesinde çocukların fiziksel, ruhsal ve bilişsel durumları gelişmektedir. Bu yüzden veli ve öğrencilerin bu yönde olan talepleri her geçen yıl artmakta ve bu doğrultuda özellikle büyükşehirlerde çok sayıda yaz okulu alternatifleri doğmaktadır. Fakat doğru bir yaz spor okulunun seçilmesi önemli bir karar verme problemi haline gelmiştir. Yaz spor okulu seçimi konusunda dikkat edilmesi gereken bazı hususlar; sunulan branşlar, eğitim içeriği, eğitmen kalitesi, fiziki şartlar ve eve yakınlığı gibi kriterler olarak sıralanabilir [1, 2]. Fakat yapılan literatür taramasında bu ve benzeri kriterleri inceleyerek karar vermeyi sağlayacak analitik bir yönteminin eksikliği fark edilmiştir.

Literatürde her ne kadar okul seçiminde kullanılabilir bazı metotlar sunulsa da, bu metotların incelemiş olduğu kriterler yaz spor okulu kriterlerinden farklılık göstermektedir. Örneğin, Polat ve Çelmeli, okul öncesi eğitim kurumu seçiminde dikkat edilmesi gereken etkenleri belirlemek için bir anket çalışması uygulamışlardır [3]. Özden ise Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) tekniği ile en iyi eğitim ve öğretim ortamını sağlayacak ilkökul seçimine yönelik bir uygulama gerçekleştirmiştir [4]. Radhakrishnan ve Kalaichelvi ise bulanık AHP ile en iyi okul seçim probleminde bir çözüm önerisi getirmişlerdir [5]. Okul seçimi konusunda daha çok üniversite tercih kriterlerinin analizi çalışılmıştır. Cerit ve ark. [6], üniversite seçiminde etkili olan faktörlere ilişkin öğrenci ve veli görüşlerini analiz etmişlerdir. Bu alandaki en kapsamlı çalışma olarak, Göksu ve Güngör, Bulanık AHP ile üniversite tercih sıralamasına dair bir uygulama gerçekleştirmişlerdir [7]. Görüldüğü üzere okul (okul öncesi, ilk, orta ve yükseköğretim) seçimine dair literatürde çeşitli çalışmalar olmasına rağmen yaz spor okullarının seçimine dair mevcut bir çalışma tespit edilememiştir. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, okul çağındaki öğrenciler için

en uygun yaz spor okulu seçiminde kullanılabilir bir metot sunmaktır.

Önerilen bu yaklaşımda ilk adım olarak, tercih kriterleri ve alternatifler tespit edilmiştir. İkinci adım olarak tercih kriterlerinin göreceli önem derecelerini belirlemek için literatürde yeni bir teknik olan tereddütlü bulanık AHP (HF-AHP) kullanılmıştır. Üçüncü adımda ise önem dereceleri belirlenen tercih kriterlerine göre TOPSIS tekniği uygulanarak farklı alternatifler sıralanmış ve en iyisi belirlenmiştir. Son adımda da verilen kararın, kriter ağırlıklarına hassasiyetini ölçmek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Çalışmanın özeti Şekil 1 de verilmektedir.



Şekil 1. Çalışmanın Özeti (Summary of the Study)

Bu çalışmanın literatüre kattığı faydalar üç katmanda sıralanabilir. En önemli katkı olarak, daha önce hiç çalışılmamış bir alan olan ‘yaz spor okulu tercih kriterleri’ incelenerek analitik bir metot ile en iyi alternatifin seçilmesine yönelik bir yaklaşım sunulmuştur. Diğer bir katkı olarak, yeni bir teknik olan HF-AHP, bugüne kadar farklı alanlarda kullanılan TOPSIS tekniği ile entegre bir şekilde kullanılmıştır. Son katkı olarak da, bugüne kadar herhangi bir okul seçim probleminde çalışılmamış olan duyarlılık analizine yer verilmiştir.

Bu doğrultuda makalenin ilerleyen kısımları şu şekildedir. İkinci kısım HF-AHP ve TOPSIS teknikleri ile ilgili literatür taramasını sunmaktadır. Üçüncü kısımda önerilen metot detaylı bir şekilde ortaya serilmektedir. Dördüncü kısımda önerilen metodun uygulanabilirliği bir örnekle desteklenmektedir. Beşinci kısımda örnek uygulama sonucunun kriter ağırlıklarına duyarlılığı analiz edilmektedir. Son kısımda ise çalışmanın sonuçları tartışılmakta ve ileri çalışma adımlarına ışık tutulmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE REVIEW)

Bu kısımda, önerilen bütünleşik yaklaşımda kullanılan Tereddütlü Bulanık AHP (HF-AHP) ile TOPSIS tekniklerine dair bir kaynakça taraması yapılmıştır.

2.1. Tereddütlü Bulanık AHP (Hesitant Fuzzy AHP)

Zadeh tarafından geliştirilen klasik bulanık küme teorisi [8], her ne kadar insan kararlarının kesin olmayan yönünü üçgenel ya da yamuk aidiyet değerleri ile göz önünde bulundursa da, karar vericinin tek bir tercih yapmakta zorlandığı tereddütlü durumlarda yetersiz kalır. Bu yüzden Torra tereddütlü bulanık kümeleri (HFS) tanımlamıştır [9]. Akabinde Rodriguez ve ark. bu kümeleri inceleyerek, dilsel ifadelerin içeriğini zenginleştirmek amacıyla tereddütlü bulanık dilsel terimler kümesini (HFLTS) önermişlerdir [10]. Bu sayede uzmanlar iki alternatifini kıyaslarken daha esnek ve anlatımsal olarak daha zengin ifadeleri kullanabilmişlerdir. Örneğin, klasik bulanık ifadelerde bir alternatif diğerine göre “Çok Üstün”, “Orta Üstün”, “Eşit” gibi ifadelerle kıyaslanabiliyorken, HFLTS ile “En azından Orta Üstün”, “Orta ve Çok Üstün Arası” ya da “En Fazla Orta Üstün” gibi ifadelerle de kıyaslanabilmesi mümkün hale gelmiştir. Bu ifadeler, tek bir bulanık dilsel ifade ile karar verilmesi zor ve tereddüt edilen durumlarda, insanların dilsel yapılarına daha uygunluk göstermektedir.

Sonraki yıllarda, Liu ve Rodriguez, dört kriterli dört alternatifli tedarikçi seçim problemini, HFLTS kullanarak geliştirilen bulanık TOPSIS yöntemi ile çözmüşlerdir [11]. Xu ve Liao ise geliştirdikleri sezgisel bulanık AHP (IF-AHP) yöntemi ile karar vericilere, üyelik ve üyelik olmayan değerleri tanımlamada daha çok esneklik sağlamışlardır [12]. Tereddütlü olma durumu Çevik-Onar ve ark. tarafından da çalışılmış ve bulanık TOPSIS yöntemi ile birlikte değerlendirilerek stratejik karar vermede kullanılmıştır [13].

Zhou ve ark., kesin olmayan tercih durumlarını yansıtmak için tereddütlü bulanık elemanları kullanarak tereddütlü sezgisel bulanık sayıları tanımlamışlardır [14]. Aynı zamanda tereddütlü sezgisel bulanık bir ortamda grup karar verme analizi için sundukları iki vaka analizi ile

çalışmalarını örneklerle desteklemişlerdir. Hu ve ark., Tip-2 Bulanık Kümeler ve Tereddütlü Bulanık Kümelerin bir türevi olan Tip-2 Tereddütlü Bulanık Kümeler ile bir model geliştirmişlerdir [15]. Geliştirdikleri bu modelin uygunluğunu ise bir örnek ile açıklamışlardır. Yavuz ve ark., hiyerarşik tereddütlü bulanık dilsel bir model geliştirmişlerdir [16]. Bu modeli kullanarak beş kriteri göz önüne alarak dört farklı yakıt tipi kullanan araçlardan en iyisini seçmişlerdir. Ek olarak yaptıkları duyarlılık analizi ile sonuçların hassasiyetini incelemişlerdir. Öztayşi ve ark. ise Tereddütlü Bulanık AHP (HF-AHP) yaklaşımını geliştirerek çok kriterli tedarikçi seçim problemine uygulamışlardır [17].

Görüldüğü üzere, tereddütlü olma kavramı son yıllarda birçok araştırmacının göz önüne aldığı bir unsurdur. İlaveten, tereddütlü olma kavramının, çok kriterli karar verme teknikleri ile birlikte kullanıldığı da gözlemlenmektedir. Fakat yapılan literatür taramasında, geliştirilen bu bütünleşik tekniklerin yaz okulu seçiminde karar verme durumunda kullanılmadığı tespit edilmiştir. Bu yüzden, bu çalışmada Tereddütlü Bulanık AHP (HF-AHP) tekniğinin yaz okulu seçim kriterlerinin önem derecelerini belirlemede kullanılması amaçlanmıştır. Kriterler ağırlıklandırıldıktan sonra ise yaz okulları TOPSIS metodu ile sıralanmışlardır. Dolayısıyla bir sonraki kısımda TOPSIS tekniği kullanılarak yapılan çalışmalar taranmıştır.

2.2. TOPSIS (TOPSIS)

Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution) tekniği çok kriterli karar verme durumlarında sıklıkla kullanılan bir yöntemdir [18]. En iyi alternatifini belirlemekteki temel yaklaşımı, pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme ise en uzak geometrik mesafeye sahip olanı bulmak üzerinedir. Önem dereceleri belirlenen kriterlere göre her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıkları hesaplanarak en iyi alternatifte karar verilir. Chen ve Hwang karar vericilerin belirsizliğini yansıtmak için Bulanık küme teorisinden faydalanarak Bulanık TOPSIS (F-TOPSIS)’i geliştirmişlerdir [19]. F-TOPSIS ile ilgili detaylı bilgi Nadaban ve ark. tarafından yapılan çalışmada bulunabilir [20]. TOPSIS ya da F-TOPSIS yöntemleri kullanılarak çok kriterli karar verme problemleri çözülmüştür. En sıklıkla

tedarikçi seçimi problemlerinde uygulamaları görülebilir.

Ayhan, F-TOPSIS yöntemi ile tedarikçi seçim probleminin bulanık ortamlarda çözümüne dair bir örnek sunmuştur [21]. Şahin ve Supçiller tedarikçi seçimi için geliştirdikleri karar destek sisteminde AHP, TOPSIS, K-ortalamlar yöntemlerini entegre bir şekilde kullanmışlardır [22]. Uygun ve Dede, F-TOPSIS tekniğini diğer bir karar verme tekniği olan Bulanık Analitik Ağ Süreci (F-ANP) ile entegre bir şekilde kullanarak alternatif tedarikçilerin sıralamasını yapmışlardır [23].

Tedarikçi seçimi ve diğer konularda bir çok uygulama örneği olsa da okul seçimine dair TOPSIS veya F-TOPSIS uygulamaları kısıtlı sayıdadır. Agrawal ve ark., Hindistan'da yüksek okul seçim problemine F-TOPSIS ve AHP bütünleşik bir model geliştirerek çözüm önerisi getirmişlerdir [24].

Yapılan literatür taramasında fark edildiği üzere okul seçiminde daha da özelinde yaz spor okulu seçiminde çok kriterli karar verme metotları ile yapılan çalışmalar yetersizdir. Bu yüzden, bir sonraki kısımda HF-AHP ve TOPSIS tekniklerini bütünleşik bir şekilde kullanarak geliştirilen ve yaz spor okulları seçiminde kullanılacak bir yaklaşım sunulmuştur.

3. ÖNERİLEN METODOLOJİ (PROPOSED METHODOLOGY)

Yaz spor okulu seçim probleminde kullanılacak olan metodoloji iki kısımdan oluşmaktadır. Öncelikle okulları değerlendirmekte kullanılacak olan kriterler belirlenip, bu kriterlerin birbirlerine göreceli ağırlıkları Tereddütlü Bulanık AHP (HF-AHP) tekniği ile bulunmaktadır. Sonrasında ise, okulların sıralaması TOPSIS metodu ile gerçekleştirilmektedir. Bu yüzden, ilk kısımda HF-AHP, ikinci kısımda ise TOPSIS tekniklerinin adımları anlatılmaktadır.

3.1. Tereddütlü Bulanık AHP (Hesitant Fuzzy AHP)

Yaz okulu seçiminde kullanılacak olan kriterlerin birbirlerine göreceli önem ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılacak olan Tereddütlü Bulanık AHP metodu aslında literatürde var olan Tereddütlü Bulanık Kümeler (HFS) ve Tereddütlü Bulanık Dilsel İfade Kümeleri

(HFLTS) ile klasik Bulanık AHP (FAHP) yaklaşımlarının bütünleşik bir halidir. Bu yaklaşımın adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Dilsel Terim kümesinin tanımlanması $S = \{S_0, S_1, \dots, S_g\}$.

Adım 2: Kriterlerin Tereddütlü Dilsel ifadeler kullanılarak ikili kıyaslamalarının yapılması.

Adım 3: Her bir $i-j$ kriter çifti için dilsel ifadeleri içeren $env[d_{ij}]$ veri zarflarının oluşturulması,

$d_{ij} =$ (Dilsel Terim Kümesinde Kullanılan bir veya daha fazla S_g)

Adım 4: Dilsel ifadelerin ve karşılık gelen üçgensel bulanık sayıların belirlenmesi.

Adım 5: $env[d_{ij}]$ veri zarflarının üçgensel bulanık sayıları içeren $env[\tilde{d}_{ij}]$ veri zarflarına dönüştürülmesi.

Adım 6: $env[\tilde{d}_{ij}]$ veri zarfı içerisindeki üçgensel bulanık sayıların ortalamasının hesaplanması.

Adım 7: Her bir i kriteri için geometrik ortalamasının (\tilde{r}_i) hesaplanması.

Adım 8: Her bir i kriteri için Denklem 1 kullanılarak bulanık ağırlıklarının hesaplanması.

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = (lw_i, mw_i, uw_i) \quad (1)$$

lw_i : i kriterinin alt ağırlığı
 mw_i : i kriterinin orta ağırlığı
 uw_i : i kriterinin üst ağırlığı

Adım 9: Chou ve Chang tarafından geliştirilen alan merkezi metodu [25] ile \tilde{w}_i bulanık sayılarının Denklem 2 kullanılarak durulaştırılması.

$$M_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \quad (2)$$

Adım 10: Durulaştırılmış (M_i) sayılarının Denklem 3 kullanılarak normalizasyonun yapılması ve her bir kriter ağırlığının (N_i) hesaplanması.

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (3)$$

HF-AHP metodu, HFLTS ile FAHP tekniklerinin bütünleşik bir hali olması sebebiyle sunulan metodolojinin ilk dört adımı HFLTS ile yapılan çalışmalara benzerlik göstermektedir [16, 26]. Bundan sonrasında ise beşinci adımda tereddütlü bulanık ifadeler veri zarfları, $env[d_{ij}]$, üçgensel bulanık sayıları içeren veri zarflarına, $env[\tilde{d}_{ij}]$, dönüştürülmektedir. Altıncı adımda ise, elde edilen bu veri zarflarına dayanarak, ortalama

bulanık sayılar hesaplanmaktadır. Metodun diğer adımları ise klasik FAHP tekniği ile örtüşmektedir.

3.2. TOPSIS (TOPSIS)

Kriter ağırlıkları hesaplandıktan sonra yaz okullarını değerlendirmekte kullanılacak olan TOPSIS yönteminin adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir [27, 28].

Adım 1: Karar Matrisi (K_{ij})

Her bir alternatifin her bir kritere göre sayısal değerlerini içeren karar matrisi Denklem 4 şeklinde oluşturulur.

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1j} \\ \dots & \dots & X_{2j} \\ X_{i1} & \dots & X_{ij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

K_{ij} matrisinde i alternatif sayısını, j kriter sayısını verir.

$X_{ij} = i$ Alternatifinin j kriterine göre sayısal değeri

Adım 2: Normalize Karar Matrisi (NK_{ij})

Denklem 5 ile karar matrisi normalize edilerek, Denklem 6 ile gösterilen NK_{ij} elde edilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^j (x_{kj})^2}} \quad (5)$$

$$NK_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1j} \\ \dots & \dots & r_{2j} \\ r_{i1} & \dots & r_{ij} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Adım 3: Ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi (ANK_{ij})

Normalize edilmiş karar matrisi ile her bir kriterin ağırlığı (w_j) ile çarpılarak Denklem 7 de gösterildiği gibi ağırlıklandırılmış Normalize Karar Matrisi elde edilir

$$ANK_{ij} = \begin{bmatrix} v_{11} = w_1 r_{11} & \dots & w_j r_{1j} \\ w_1 r_{21} & \dots & w_j r_{2j} \\ w_1 r_{i1} & \dots & v_{ij} = w_j r_{ij} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Adım 4: Pozitif İdeal (A^*) ve Negatif İdeal (A^-) Çözümlerin Oluşturulması

TOPSIS yöntemi, her bir kriter değerinin monoton artan veya azalan bir eğilime sahip olduğunu varsaymaktadır. Pozitif ideal çözüm setinin (A^*) oluşturulabilmesi için ANK_{ij} matrisindeki ağırlıklandırılmış kriter değerlerinin yani sütun değerlerinin en büyükleri (ilgili değerlendirme faktörü minimizasyon yönlü ise en küçükü) seçilir (Denklem 8).

Negatif İdeal çözüm setinin (A^-) oluşturulabilmesi için ANK_{ij} matrisindeki ağırlıklandırılmış kriter değerlerinin yani sütun değerlerinin en küçükleri (ilgili değerlendirme faktörü minimizasyon yönlü ise en büyüğü) seçilir (Denklem 9).

$$A^* = \{(\max v_{ij} \mid j \in J), (\min v_{ij} \mid j \in J')\} \quad (8)$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} \mid j \in J), (\max v_{ij} \mid j \in J')\} \quad (9)$$

Denklem 8 ve 9'da J fayda (maksimizasyon), J' ise kayıp (minimizasyon) değerini göstermektedir. Her iki çözüm seti, kriter sayısı kadar elemandan oluşmaktadır.

Adım 5: Ayırım Ölçütlerinin Hesaplanması

Her bir alternatifin, pozitif ideal çözümden uzaklığı Denklem 10'daki gibi hesaplanır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (10)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

Benzer şekilde, her bir alternatifin, negatif ideal çözümden uzaklığı Denklem 11'deki gibi hesaplanır.

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

Adım 6: İdeal Çözüme Göreceli Yakınlığın Hesaplanması

Her bir alternatifin ideal çözüme göreceli yakınlığı Denklem 12'deki gibi hesaplanır

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{(S_i^* + S_i^-)} \quad (12)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

C_i^* , 0 ile 1 arasında değerler alır ve ne kadar büyükse ilgili alternatif, pozitif ideal çözüme o kadar yakındır ve başarılıdır.

Adım 7 Alternatiflerin Sıralanması

Her bir alternatif C_i^* değerine göre azalan bir sıra ile sıralanır.

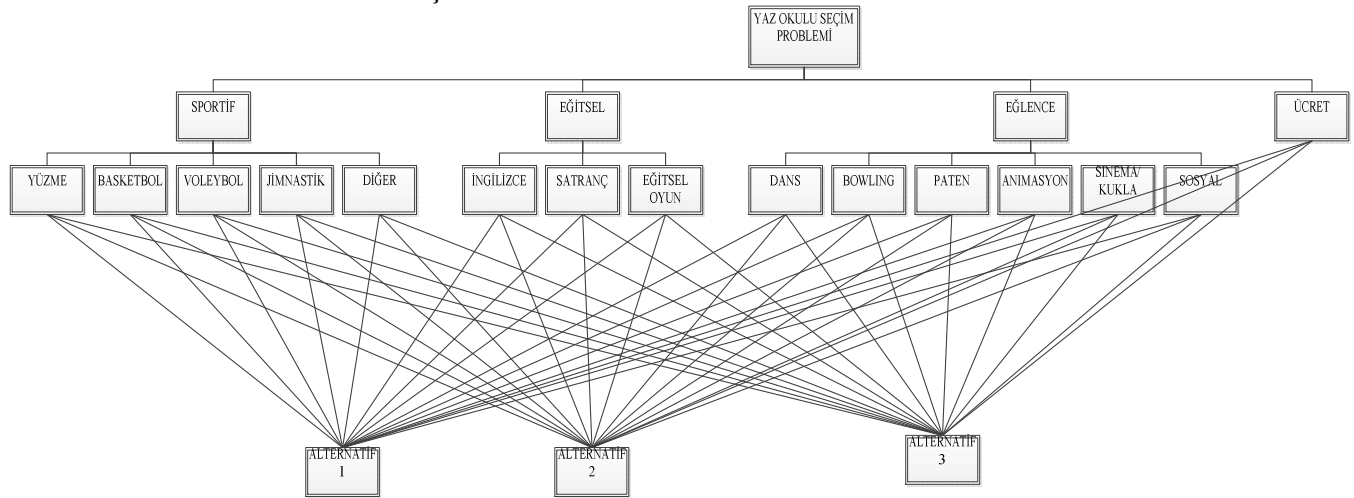
4. UYGULAMA (CASE STUDY)

Bu bölümde, yaz okulu seçimi için geliştirilen bütünleşik HF-AHP ve TOPSIS yaklaşımın uygulanabilirliğini göstermek için bir örnek sunulmuştur. Bu örnekte, kız çocuğu ilkokul ikinci sınıfı bitiren bir veli, karar verici olarak 3 farklı yaz okulunu 4 ana kritere göre, toplamda ise 15 kritere göre değerlendirmiştir. Karar verici olarak tek bir velinin görüşlerinin alınması karar

analizi çalışmalarına göre değerlendirildiğinde yetersiz görünebilir. Fakat daha önce bu alanda hiçbir analitik çalışmanın mevcut olmadığı gözle alındığında önemli bir uygulamadır. Ayrıca verilecek kararın kişiye özel olması ve son derece öznel olması sebebiyle farklı karar vericiler çok farklı değerlendirmelerde bulunabilir. Dolayısıyla bu tip özel uygulama alanlarında, grup çalışması ile ortak bir kararda bulunulması oldukça zordur. Fakat yine de çalışmanın daha kapsayıcı olması adına başka çalışmalarda birden fazla karar verici ile bir analizin gerçekleştirilmesi önerilebilir. Ayrıca, bu çalışmada incelenen kurumların bilgilerinin korunması adına yaz okulları "Alternatif" olarak adlandırılmıştır. Ana ve alt

kriterlerin hiyerarşik ilişkisi Şekil 2'de gösterilmektedir.

Bu kriterler seçilirken farklı yaz okullarının sunmuş oldukları eğitim programları incelenmiş ve değerlendirilen üç alternatifin ortak olarak sundukları faaliyetler ve bu faaliyetlerin eğitim programı dâhilindeki süreleri kaydedilmiştir. Buna göre her bir yaz okulu alternatifinin belirlenen kriterlere göre sunulan etkinlik süreleri ve dönemsel ücretleri Tablo 1'de verilmektedir.



Şekil 2. Ana ve alt kriterlerin hiyerarşik ilişkisi (Hierarchical relationship of main and sub criteria)

Tablo 1. Her bir alternatif yaz okulunun ana ve alt kriterlere göre sunulan etkinlik süreleri ve ücretleri (Activity durations and prices for each alternative summer school with respect to main and sub criteria)

Ana Kriter	Alt Kriter	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
Sportif	Yüzme (dk.)	180	300	375
	Basketbol (dk.)	120	120	225
	Voleybol (dk.)	120	120	150
	Jimnastik (dk.)	75	75	225
	Diğer (dk.)	300	300	150
Eğitsel	İngilizce (dk.)	0	120	0
	Satranç (dk.)	120	60	0
	Eğitsel Oyun (dk.)	40	40	0
Eğlence	Dans (dk.)	120	120	0
	Bowling (dk.)	120	120	0
	Paten (dk.)	240	120	0
	Animasyon (dk.)	60	60	0
	Sinema/kukla (dk.)	120	60	0
	Sosyal (dk.)	60	60	375
	Ücret (TL)	1000	1300	1200

Tablo 1 elde edilirken, bazı okulların sunmuş olduğu bazı faaliyetlerin diğer okullar tarafından sunulmadığı gözlemlenmiştir. Örneğin bir okul kukla gösterisi sunarken bir diğeri sinema gösterisi sunmaktadır. Bunun gibi benzer faaliyetler aynı başlık altında toplanmıştır. Benzer bir şekilde, bir okul masa tenisi etkinliğini sunarken bir diğeri badminton ya da okçuluk gibi daha nadir görülen etkinlikler sunmaktadır. Dolayısıyla buna benzer, nadir ve her okulda ortak olarak sunulmayan etkinlikler “Sportif” faaliyetler altında ‘Diğer’ başlığında incelenmiştir. Ayrıca Tablo 1 detaylı incelendiğinde Alternatif 3’ün sadece sportif ağırlıklı olduğu diğer ikisinin ise biraz daha dengeli bir program sundukları gözlenmektedir. Ücret konusunda ise üç haftalık eğitim programları incelendiği için ortak paydayı sağlamak adına üç haftalık ücretleri değerlendirilmiştir.

Uygulamada ele alınan kriterlere ek olarak eğitimcilerin kalitesi, tesislerin temizliği, verilen eğitimin kalitesi gibi unsurlar da değerlendirilebilir. Fakat bu tip yaz okullarında görüşmeye gidildiğinde söylenenler ile gerçekleşen durumlar aynı olmadığı için bu tip öznel değerlendirmeler kriter listesine dâhil edilmemiştir. Bunun yerine verilen eğitim programlarındaki etkinlik süreleri nesnel veriler olarak kriter listesinde değerlendirilmiştir. Ayrıca her üç alternatif de yaklaşık olarak aynı mesafede oldukları için eve olan uzaklık bir kriter olarak ele alınmamıştır.

İlerleyen kısımlarda öncelikle ana ve alt kriterlerin birbirlerine göreceli önem ağırlıkları HF-AHP ile hesaplanmış sonrasında ise ağırlıklandırılmış kriterlere göre alternatifler değerlendirilmiş ve en iyi alternatif TOPSIS tekniği ile seçilmiştir.

4.1. HF-AHP (HF-AHP)

Ana ve alt kriterlerin önem derecelerinin hesaplanması için Bölüm 3.1.’de sunulan Tereddütlü Bulanık AHP (HF-AHP) tekniği kullanılmıştır. Fakat işlem yoğunluğunu azaltmak için sadece ana kriter hesaplamaları detaylı olarak gösterilmiştir.

Adım 1: Dilsel Terim kümesinin tanımlanması $S = \{\text{Eşit Önemli (EÖ)}, \text{Zayıf Önemli (ZÖ)}, \text{Güçlü Önemli (GÖ)}, \text{Çok Güçlü Önemli (ÇGÖ)}, \text{Mutlak Önemli (MÖ)}\}$.

Adım 2: Kriterlerin Tereddütlü Dilsel ifadeler kullanılarak yapılan ikili kıyaslamaları Tablo 2’de gösterilmiştir. Klasik F-AHP’den farklı olarak, HF-AHP’de karar vericilerin birden fazla bulanık dilsel ifade kullanmasına izin verilmiştir. Örnek olarak “Sportif” faaliyetler “Eğlence” kriterine göre ‘En Fazla Güçlü Önemli’ olarak değerlendirilmiştir.

Adım 3: Her bir $i-j$ kriter çifti için oluşturulan ve dilsel ifadeleri içeren $env[d_{ij}]$ zarfları Tablo 3’de verilmiştir.

Adım 4: Dilsel ifadeler ve karşılık gelen üçgensel bulanık sayılar Tablo 4’de verilmiştir.

Adım 5: $env[d_{ij}]$ zarflarının üçgensel bulanık sayıları içeren $env[\tilde{d}_{ij}]$ zarflarına dönüştürülmesi sonucu Tablo 5 elde edilmiştir

Örnek olarak, “Sportif” kriterinin “Eğlence” kriterine göre kıyaslamasını içeren veri zarfı Denklem 13’deki gibidir

$$env[\tilde{d}_{S-EGL}] = [(1.000, 1.500, 2.000); (1.500, 2.000, 2.500)] \quad (13)$$

Diğer taraftan, “Eğlence” kriterinin “Sportif” kriterine göre kıyaslamasını içeren veri zarfı Denklem 14’deki gibidir

$$env[\tilde{d}_{EGL-S}] = \left[\left(\frac{1}{2.5}, \frac{1}{2.0}, \frac{1}{1.5} \right); \left(\frac{1}{2.0}, \frac{1}{1.5}, \frac{1}{1.0} \right) \right] = [(0.400, 0.500, 0.667); (0.500, 0.667, 1.000)] \quad (14)$$

Adım 6: $env[\tilde{d}_{ij}]$ veri zarfı içerisindeki üçgensel bulanık sayıların aritmetik ortalaması Tablo 6’da verilmiştir.

Tereddütlü olma problemi çözüldükten sonra, klasik F-AHP probleminde uygulanan yöntemlerle çözüme devam edilmiştir [30, 31]:

Adım 7: Her bir i kriterinin geometrik ortalaması (\tilde{r}_i) Buckley [32]’e göre hesaplanmış ve Tablo 7’de verilmiştir.

Adım 8: Her bir i kriteri için Denklem 15 kullanılarak bulanık ağırlıkları hesaplanmış ve Tablo 8’de verilmiştir.

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \otimes (\tilde{r}_1 \oplus \tilde{r}_2 \oplus \dots \oplus \tilde{r}_n)^{-1} = (lw_i, mw_i, uw_i) \quad (15)$$

lw_i : i kriterinin alt ağırlığı

mw_i : i kriterinin orta ağırlığı

uw_i : i kriterinin üst ağırlığı

Tablo 2. Tereddütlü dilsel ifadelerle kriterlerin ikili kıyaslamaları (Pairwise comparisons of criteria with hesitant linguistic terms)

MÖ	ÇGÖ	GÖ	ZÖ	Kriterler	EÖ	Kriterler	ZÖ	GÖ	ÇGÖ	MÖ
				Sportif		Eğitsel	✓			
		✓	✓	Sportif		Eğlence				
				Sportif		Ücret		✓	✓	
✓	✓	✓		Eğitsel		Eğlence				
				Eğitsel		Ücret	✓			
				Eğlence		Ücret			✓	✓

Tablo 3. Her bir $i-j$ kriter çifti için dilsel ifadeleri içeren zarflar (The envelope of linguistic terms for each $i-j$ pair of criteria)

Kriterler	Sportif	Eğitsel	Eğlence	Ücret
Sportif(S)	[EÖ]	-	[ZÖ,GÖ]	-
Eğitsel(Eğt)	[ZÖ]	[EÖ]	[GÖ,ÇGÖ,MÖ]	-
Eğlence (Eğl)	-	-	[EÖ]	-
Ücret(Ü)	[GÖ, ÇGÖ]	[ZÖ]	[ÇGÖ, MÖ]	[EÖ]

Tablo 4. Dilsel ifadeler ve ilgili üçgensel bulanık sayılar [29] (Linguistic terms and corresponding triangular fuzzy numbers [29])

Dilsel İfadeler	Üçgensel Bulanık Sayılar (TFN)	Ters Üçgensel Bulanık Sayılar
Eşit Önemli (E.Ö)	(1/2, 1, 3/2)	(2/3, 1, 2)
Zayıf Önemli (Z.Ö.)	(1, 3/2, 2)	(1/2, 2/3, 1)
Güçlü Önemli (G.Ö.)	(3/2, 2, 5/2)	(2/5, 1/2, 2/3)
Çok Güçlü Önemli (Ç.G.Ö.)	(2, 5/2, 3)	(1/3, 2/5, 1/2)
Mutlak Önemli (M.Ö.)	(5/2, 3, 7/2)	(2/7, 1/3, 2/5)

Tablo 5. Her bir $i-j$ kriter çifti için üçgensel bulanık sayıları içeren zarflar (The envelope of TFNs for each pair of criteria)

Kriterler	Sportif	Eğitsel	Eğlence	Ücret
Sportif (S)	[(0.500,1.000,1.500)]	[(0.500,0.667,1.000)]	[(1.000,1.500,2.000); (1.500,2.000,2.500)]	[(0.333,0.400,0.500); (0.400,0.500,0.667)]
Eğitsel (Eğt)	[(1.000,1.500,2.000)]	[(0.500,1.000,1.500)]	[(1.500,2.000,2.500); (2.000,2.500,3.000); (2.500,3.000,3.500)]	[(0.500,0.667,1.000)]
Eğlence (Eğl)	[(0.400,0.500,0.667); (0.500,0.667,1.000)]	[(0.286,0.333,0.400); (0.333,0.400,0.500); (0.400,0.500,0.667)]	[(0.500,1.000,1.500)]	[(0.286,0.333,0.400); (0.333,0.400,0.500)]
Ücret (Ü)	[(1.500,2.000,2.500); (2.000,2.500,3.000)]	[(1.000,1.500,2.000)]	[(2.000,2.500,3.000); (2.500,3.000,3.500)]	[(0.500,1.000,1.500)]

Tablo 6. Bulanık kıyaslama değerlerinin her bir $i-j$ kriter çifti için aritmetik ortalaması (Arithmetic averaged fuzzy pair wise comparisons of each $i-j$ criteria)

Kriterler	Sportif	Eğitsel	Eğlence	Ücret
Sportif (S)	[(0.500,1.000,1.500)]	[(0.500,0.667,1.000)]	[(1.250,1.750,2.250)]	[(0.367,0.450,0.583)]
Eğitsel (Eğt)	[(1.000,1.500,2.000)]	[(0.500,1.000,1.500)]	[(2.000,2.500,3.000)]	[(0.500,0.667,1.000)]
Eğlence (Eğl)	[(0.450,0.583,0.833)]	[(0.333,0.400,0.500)]	[(0.500,1.000,1.500)]	[(0.310,0.367,0.450)]
Ücret (Ü)	[(1.750,2.250,2.750)]	[(1.000,1.500,2.000)]	[(2.250,2.750,3.250)]	[(0.500,1.000,1.500)]

Tablo 7. Bulanık kıyaslama değerlerinin geometrik ortalaması (Geometric means of fuzzy comparison values)

Kriterler	\tilde{r}_i		
Sportif (S)	0.582	0.852	1.184
Eğitsel (Eğt)	0.841	1.259	1.732
Eğlence (Eğl)	0.390	0.541	0.728
Ücret (Ü)	1.185	1.745	2.276
Toplam (lw_i, mw_i, uw_i)	2.997	4.398	5.919
-1. Kuvveti ($1/uw_i, 1/mw_i, 1/lw_i$)	0.169	0.227	0.334

Tablo 8. Her bir kriterin bulanık ağırlığı (Fuzzy weights of each criterion)

Kriterler	(\tilde{w}_i)		
Sportif (S)	0.098	0.193	0.395
Eğitsel (Eğt)	0.142	0.286	0.578
Eğlence (Eğl)	0.066	0.123	0.243
Ücret (Ü)	0.200	0.397	0.759

Örneğin, “Sportif” kriterinin bulanık ağırlığı Denklem 16’deki gibi hesaplanmıştır.

$$\tilde{w}_S = [(0.582 * 0.169); (0.852 * 0.227); (1.184 * 0.334)] = [0.098; 0.193; 0.395] \quad (16)$$

Adım 9 ve 10: Chou ve Chang [25] tarafından geliştirilen alan merkezi metodu ile \tilde{w}_i bulanık sayıları Denklem 17 kullanılarak durulaştırılmıştır. Durulaştırılmış (M_i) sayılarının Denklem 18 ile normalizasyonu yapılarak hesaplanan her bir kriter ağırlığı (N_i) Tablo 9’da verilmiştir.

$$M_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \quad (17)$$

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (18)$$

Tablo 9. Durulaştırılmış (M_i) ve normalizasyonu yapılmış (N_i) kriter ağırlıkları (De-fuzzified (M_i) and normalized (N_i) relative weights of criteria)

Kriterler	M_i	N_i
Sportif (S)	0.229	0.197
Eğitsel (Eğt)	0.335	0.289
Eğlence (Eğl)	0.144	0.124
Ücret (Ü)	0.452	0.390

Benzer metodoloji alt kriterler için yapılarak alt kriterlerin yerel ağırlık dereceleri hesaplanmıştır. Bu değerler ana kriterlerin ağırlık dereceleri ile çarpılarak her bir alt kriterin global ağırlığı hesaplanmış ve Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Ana ve alt kriterlerin yerel ve global ağırlıkları (Local and global weights of main and sub criteria)

Ana ve Alt Kriter Ağırlıkları		Yerel Ağırlıklar	Global Ağırlıklar
Sportif (0.197)	Yüzme	0.336	0.066
	Basketbol	0.231	0.046
	Voleybol	0.181	0.036
	Jimnastik	0.160	0.032
	Diğer	0.093	0.018
Eğitsel (0.289)	İngilizce	0.539	0.156
	Satranç	0.289	0.084
	Eğitsel Oyun	0.172	0.050
	Dans	0.265	0.033
Eğlence (0.124)	Bowling	0.219	0.027
	Paten	0.219	0.027
	Animasyon	0.155	0.019
	Sinema/Kukla	0.071	0.009
Ücret (0.390)	Sosyal	0.071	0.009
			0.390

4.2. TOPSIS (TOPSIS)

Önem dereceleri belirlenen kriterlere göre alternatiflerin sıralanması için Bölüm 3.2’de anlatılan TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. 1. Adımda anlatılan, her bir alternatif okulun her bir kriterine göre sayısal değerini içeren karar matrisi Tablo 1’de verilmiştir. Adım 2-5 arası ise, TOPSIS yöntemi literatürde çokça uygulanan bir yöntem olduğu ve detayları Bölüm 3.2’de verildiği için bu kısımda yer almayıp *Ekler* kısmında verilmiştir. 2. Adımda hazırlanan ‘Normalize Karar Matrisi’ *Tablo Ek-1*’de, 3. Adımda hazırlanan ‘Ağırlıklandırılmış Normalize Edilmiş Karar Matrisi’ *Tablo Ek-2*’de, 4. Adımda hazırlanan ‘Pozitif ve Negatif İdeal Çözüm Setleri’ *Tablo Ek-3*’de, 5. Adımda hazırlanan her bir alternatif için ‘Pozitif ve Negatif İdeal Ayrım Ölçüleri’ *Tablo Ek-4*’de verilmiştir. 6. Adımda ise her bir alternatif okulun pozitif ideal sonuca yakınlığı ve sıralaması hesaplanıp Tablo 11’de sunulmuştur. 7. Adımda ise yakınlık değerlerine göre alternatifler sıralanmıştır.

Tablo 11. Alternatiflerin ideal sonuca yakınlık ve sıralamaları (Closeness to ideal solutions and the ranking of alternatives)

Alternatifler	Yakınlık	Sıralama
A-1	0.405	2
A-2	0.691	1
A-3	0.183	3

Görüldüğü üzere, incelenen 4 ana ve 15 alt kriterine göre 3 alternatif okul arasından, ideal sonuca en yakın olduğu için A-2 alternatifi seçilmiştir. Fakat verilen kararın kriter ağırlıklarına hassasiyetinin

de ölçülmesi gerekmekte ve bir sonraki kısımda incelenmektedir.

5. DUYARLILIK ANALİZİ (SENSITIVITY ANALYSIS)

Yaz okulu seçim probleminde karar verirken kullanılan 4 ana ve toplamda 15 alt kriterin ağırlıklarında oluşabilecek bir değişiklik verilen kararı etkileyebilir. Dolayısıyla ilk önce her bir ana kriter ağırlığına bağlı olarak bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. MS Excel v.2016 kullanılarak yapılan duyarlılık analizinde, her bir ana kriter ağırlığının toplam önem ağırlığındaki derecesi değiştirilerek incelenmiştir. Her bir ana kriter ağırlığına göre yapılan duyarlılık analizi Şekil 3.a-d'de verilmiştir. Ayrıca değişen ana kriter ağırlığına göre üç alternatifin yeni 'İdeal Sonuca Yakınlık' değerleri de gösterilmiştir.

Sonrasında ise, 15 alt kriterden karar verici için en önemli faaliyetler olan "Yüzme" ve "İngilizce" alt kriterlerine göre bir duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Yine aynı şekilde, MS Excel v.2016 kullanılarak yapılan duyarlılık analizinde, her bir alt kriter ağırlığının toplam önem ağırlığındaki derecesi değiştirilerek incelenmiştir. Şekil 4.a-b'de, değişen alt kriter ağırlıklarına göre üç alternatifin yeni 'İdeal Sonuca Yakınlık' değerleri gösterilmiştir.

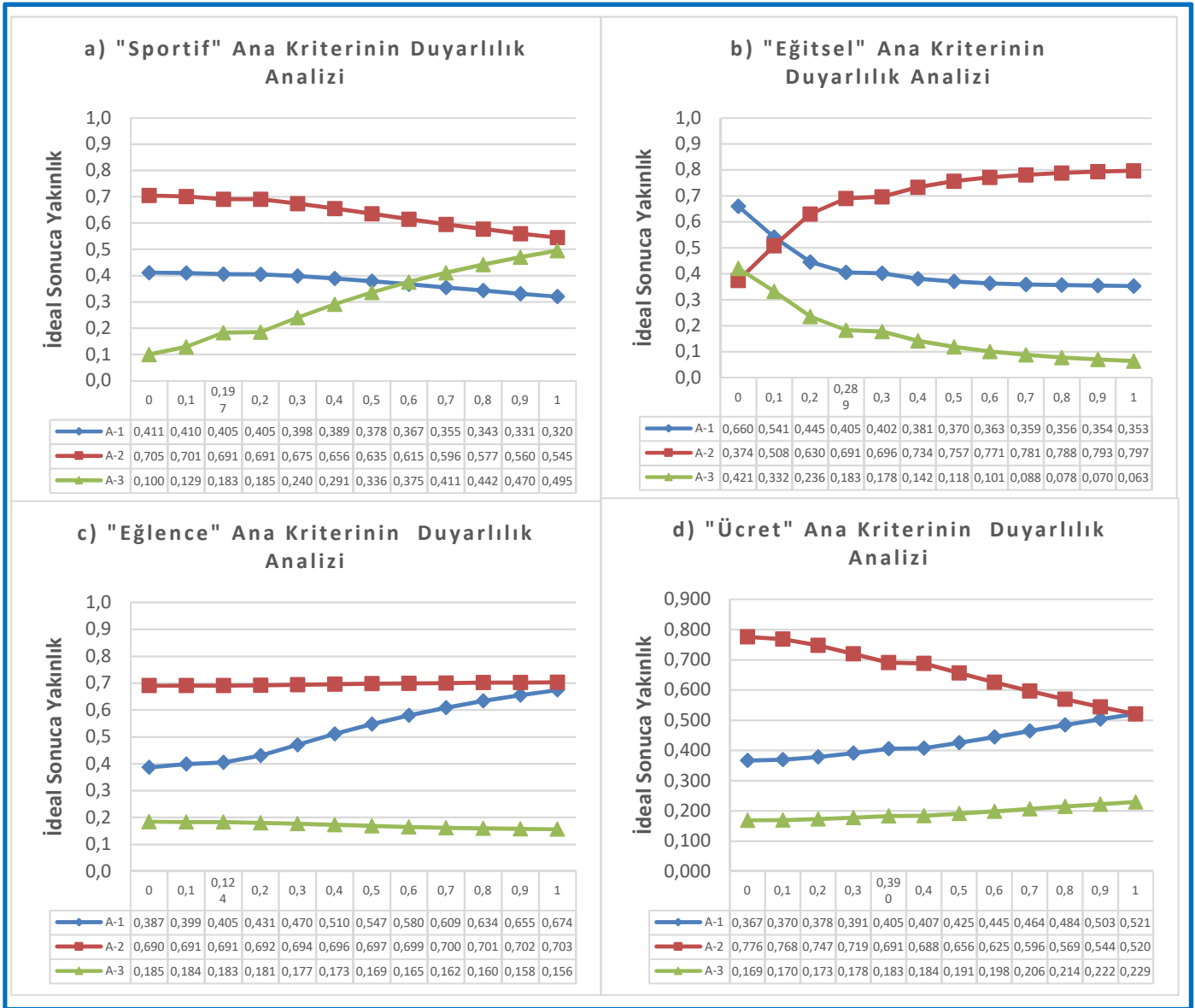
Şekil 3.a.'da görüldüğü üzere örnek uygulamada olduğu gibi "Sportif" ana kriter ağırlığı 0.197 olduğu durumda A-1, A-2 ve A-3 alternatiflerinin 'İdeal Sonuca Yakınlık' değerleri sırasıyla 0.405, 0.691 ve 0.183 olarak hesaplanmıştır. MS-Excel programı ile yapılan duyarlılık analizinde "Sportif" ana kriter ağırlığı, 0 ile 1 arasında hangi ağırlığı alırsa alsın A-2 alternatifinin diğer alternatiflere göre 'yakınlık' değeri daha yüksek çıkmaktadır. Bu sebepten dolayı, verilen karar "Sportif" ana kriter ağırlığından bağımsızdır denilebilir. Aynı durum Şekil 3.c.'de "Eğlence"

ve Şekil 3.d'de "Ücret" ana kriterleri için de geçerlidir. Sadece Şekil 3.d.'de "Ücret" kriter ağırlığı 1 olduğu durumda A-1 alternatifi A-2 alternatifinden 0.001 değerinde daha iyi çıkmıştır. Fakat ücret kriter ağırlığının en uç noktasında meydana gelen bu değişim sadece 0.001'lik bir fark oluşturduğu için bu karar değişimi göz ardı edilebilir bir durumdur.

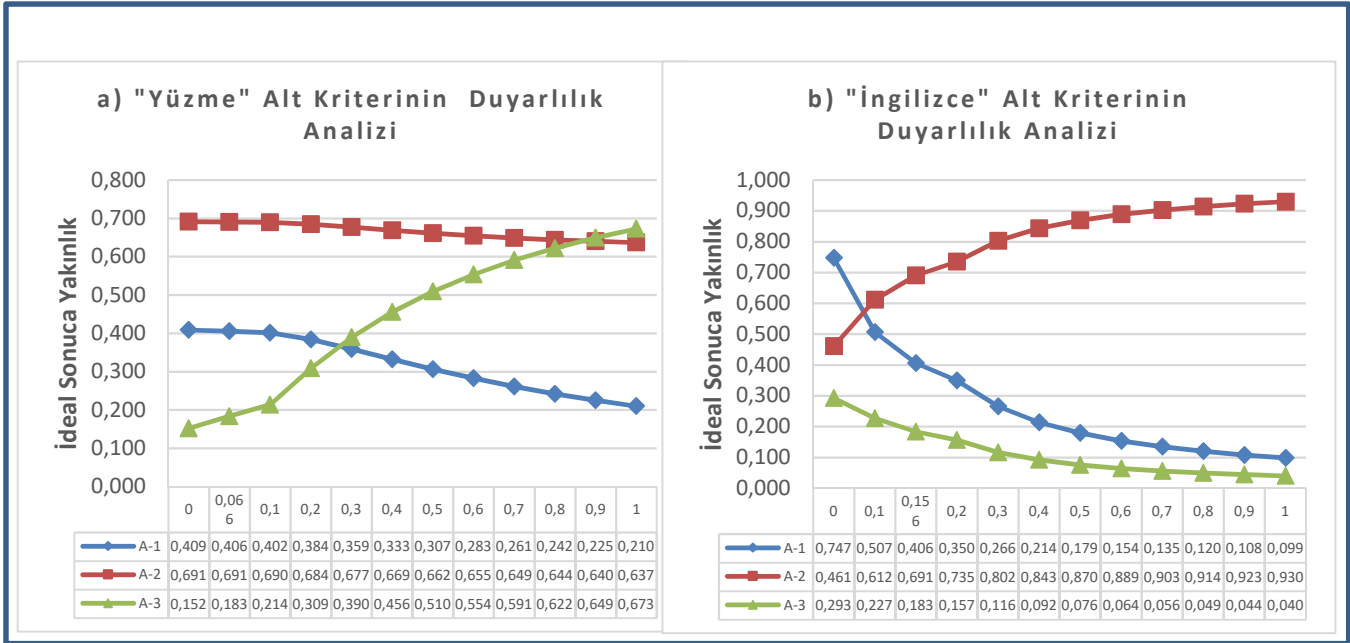
Diğer taraftan, Şekil 3.b.'de görüldüğü üzere, "Eğitsel" ana kriter ağırlığı mevcut durumdaki 0.289'dan 0.1 ve daha alt değerlere düştüğü zaman A-1 alternatifinin yakınlık değeri A-2 alternatifinden daha yüksek olmuştur. Bu da verilen kararın "Eğitsel" ana kriter ağırlığına duyarlı olduğunu göstermiştir.

Benzer şekilde 15 alt kriterden "Yüzme" ve "İngilizce" alt kriterlerinin farklı değerlerine göre yapılan duyarlılık analizinde verilen kararın her iki alt kriter ağırlığına bağlı olduğu Şekil 4.a.ve Şekil 4.b.'de görülmektedir. Şekil 4.a.'da "Yüzme" alt kriter ağırlığının değeri 0.9 ve üzeri değerler aldığı anda, A-3 alternatifi A-2 alternatifine göre tercih edilir duruma gelmiştir. Bunun sebebi ise A-3 alternatifin 375 dakika ile en yüksek sürede "Yüzme" etkinliği sunmasıdır. Şekil 4.b.'de ise "İngilizce" alt kriter ağırlığının değeri 0.1'den daha az olduğunda, A-1 alternatifi A-2 alternatifine tercih edilir olmuştur. Diğer bir deyişle İngilizce kriteri önemini yitirirse A-2 alternatifinin sunmuş olduğu 120 dakikalık İngilizce etkinliğinin hiçbir önemi kalmayacak ve A-1 alternatifi seçilecektir.

Yapılan duyarlılık analizini özetlemek gerekirse, verilen 'A-2 yaz spor okulunun seçimi' kararı, "Eğitsel" ana kriterinin ve "Yüzme" ile "İngilizce" alt kriterlerinin ağırlıklarına göre değişebilir. Fakat her üç durumda da bahsedilen değişimler kriter ağırlıklarının uç noktalarında gerçekleştiği için verilen kararın sabit olduğu söylenebilir.



Şekil 3.a-d. Ana Kriterlerin Farklı Önem Değerlerine Göre Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis of Main Criteria with respect to Different Importance Values)



Şekil 4.a-b. Alt Kriterlerin Farklı Önem Değerlerine Göre Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis of Sub Criteria with respect to Different Importance Values)

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu makalede, yaz spor okulları seçim problemine çok kriterli karar verme tekniklerinden Tereddütlü Bulanık AHP (HF-AHP) ve TOPSIS yöntemleri bütünleşik bir şekilde kullanılarak bir çözüm önerisi getirilmiştir. Her ne kadar okul seçim problemleri daha önce çalışılmış olsa bile, daha önce hiç çalışılmamış bir alan olan ‘yaz spor okulu tercih kriterleri’ incelenmiştir. Öncelikle bu karar verme problemine dair kriterler hiyerarşik olarak belirlenmiştir. Tespit edilen 4 ana, toplamda 15 alt kriterin göreceli ağırlıkları literatürde yeni olan Tereddütlü Bulanık AHP (HF-AHP) metodu ile hesaplanmıştır. İkinci adımda ise, TOPSIS yöntemi ile 3 alternatif arasından en iyi yaz spor okulu seçilmiştir. Son olarak verilen kararın, kriterlerin göreceli ağırlıklarına dair duyarlılık analizi yapılmıştır.

Bu çalışmanın literatüre olan katkısı üç başlıkta özetlenebilir. İlk olarak, daha önce hiç çalışılmamış bir alan olan yaz spor okulları seçimine bir çözüm önerisi sunmaktadır. Yaz spor okulu seçimi son yıllarda yükselen bir talep görmekte ve buna bağlı olarak, doğru yaz spor okulunu seçmek önemli bir karar verme problemi haline gelmektedir. İkinci katkısı ise, literatürde yakın zamanda ortaya çıkan “Tereddütlü Bulanık AHP –(HF-AHP)” metodunun bir karar verme probleminde kullanılmasıdır. HF-AHP genellikle ‘Tereddütlü’ tercih belirleme durumlarında sıkça başvurulan bir yöntem olmaya adaydır. Son katkısı ise, bu tarz okul seçim problemlerinde daha önce hiç başvurulmayan duyarlılık analizinin gerçekleştirilmesidir. Bu sayede verilen kararın kriter ağırlıklarına hassasiyeti ölçülebilir.

Yapılan çalışma kapsamlı bir çalışma olmasına rağmen, bazı ileri çalışmalara açık bir alandır. Öncelikle karar analizinin daha kapsayıcı olması adına birden çok karar vericinin görüşleri değerlendirilerek, bir grup karar verme çalışması geliştirilebilir. Diğer taraftan kriter listesi tesislerin yeterliliği, eğitmen

kadrosunun kalitesi gibi öznel verileri de içerebilir. Ayrıca kriter ağırlıklarına göre yapılan duyarlılık analizi verilen eğitim saatlerinin değişimine göre de incelenebilir. Bu sayede çift boyutlu bir hassasiyet analizi gerçekleştirilebilir. Son olarak yaz spor okullarının çeşitliliği, niteliği ve niceliği arttıkça diğer çok kriterli karar verme yöntemlerinin farklı uygulamaları yapılabilir.

EKLER- TOPSIS Uygulama Adımları 2-5 (APPENDICES- TOPSIS Steps 2-5)

Tablo Ek-1. Adım 2: Normalize karar matrisi (Step 2: Standardized decision matrix)

	A-1	A-2	A-3
Yüzme	0,351	0,585	0,731
Basketbol	0,426	0,426	0,798
Voleybol	0,53	0,53	0,662
Jimnastik	0,302	0,302	0,905
Diğer	0,667	0,667	0,333
İngilizce	0	1,000	0
Satranç	0,894	0,447	0
Eğitsel oyun	0,707	0,707	0
Dans	0,707	0,707	0
Bowling	0,707	0,707	0
Paten	0,894	0,447	0
Animasyon	0,707	0,707	0
Sinema/kukla	0,894	0,447	0
Sosyal	0,156	0,156	0,975
Ücret	0,492	0,640	0,590

Tablo Ek-2. Adım 3: Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi (Step 3: Standardized weighted decision matrix)

	A-1	A-2	A-3
Yüzme	0,023	0,039	0,048
Basketbol	0,019	0,019	0,036
Voleybol	0,019	0,019	0,024
Jimnastik	0,01	0,01	0,029
Diğer	0,012	0,012	0,006
İngilizce	0	0,156	0
Satranç	0,075	0,037	0
Eğitsel oyun	0,035	0,035	0
Dans	0,023	0,023	0
Bowling	0,019	0,019	0
Paten	0,024	0,012	0
Animasyon	0,014	0,014	0
Sinema/kukla	0,008	0,004	0
Sosyal	0,001	0,001	0,009
Ücret	0,192	0,249	0,230

Tablo Ek-3. Adım 4: Pozitif ve negatif ideal çözüm setleri (Step 4: Positive and negative ideal solution sets)

	A*	A-
Yüzme	0,048	0,023
Basketbol	0,036	0,019
Voleybol	0,024	0,019
Jimnastik	0,029	0,001
Diğer	0,012	0,006
İngilizce	0,156	0
Satranç	0,075	0
Eğitsel oyun	0,035	0
Dans	0,023	0
Bowling	0,019	0
Paten	0,024	0
Animasyon	0,014	0
Sinema/kukla	0,008	0
Sosyal	0,009	0,001
Ücret	0,192	0,249

Tablo Ek-4. Adım 5: Her bir alternatif için pozitif ve negatif ideal ayırım ölçüleri (Step 5: Positive and negative ideal separation measures for each alternative)



	S_i^*	S_i^-
A-1	0,160	0,109
A-2	0,075	0,169
A-3	0,185	0,042

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] S. Duygulu, «TavsiyeEdiyorum.com» [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: http://www.tavsiyeediyorum.com/makale_7038.htm. [Son Erişim:10 Ocak 2017]
- [2] A. Güreş, «Aydindenge.com» [Çevrimiçi]. Erişim Adresi: <http://www.aydindenge.com.tr/yazi/yardoc-dr-ali-gures/08/06/2013/yaz-spor-okullari>. [Son Erişim:10 Nisan 2017]
- [3] C. Polat ve Ö. Çelmeli, “Okul Öncesi Eğitim Kurumu Seçiminde Tüketici Tercih Etkenleri”, *Kastamonu Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Sayı 8, 144-166, 2015.
- [4] Ü.H. Özden, “Analitik Hiyerarşi yöntemi ile ilkökul seçimi”, *Marmara Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi*, CİLT XXIV, Sayı 1, 299-320, 2008
- [5] R. Radhakrishnan ve A. Kalaichelvi, “Selection of the best school for the children- A decision making model using extent analysis method on fuzzy analytic hierarchy process”, *International Journal of Innovative Research in Science Engineering and Technology*, Cilt 3(5), 12334-12344, 2014.
- [6] Y. Cerit, K. Yıldız ve N. Akgün, “Üniversite seçiminde etkili olan faktörlere ilişkin eğitim fakültesi öğrencilerinin görüşleri”, *Milli Eğitim Dergisi*, Sayı 173, 314-330, 2007.

- [7] A. Göksu ve İ. Güngör, “Bulanık Analitik Hiyerarşi Proses ve Üniversite Tercih Sıralamasında Uygulanması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Cilt 13(3), 1-26, 2008.
- [8] L. Zadeh, “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, Cilt 8(3), 199-249, 1965.
- [9] V. Torra, “Hesitant Fuzzy Sets”, *International Journal of Intelligent Systems*, Cilt 25 (6), 529-539, 2010.
- [10] Rodriguez, R.M., Martinez, L. ve Herrera, F. “Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets for Decision Making”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Cilt 20(1), 109-119, 2012.
- [11] H. Liu ve R.M. Rodriguez, “A fuzzy envelope for hesitant fuzzy linguistic term set and its application to multi-criteria decision making”, *Information Sciences*, Cilt 258, 220–238, 2014.
- [12] Z. Xu ve H. Liao, “Intuitionistic Fuzzy Analytical Hierarchy Process”, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Cilt 22(4), 749-761, 2014.
- [13] S. Çevik-Onar, B. Öztaysi ve C. Kahraman, “Strategic Decision Selection Using Hesitant Fuzzy TOPSIS and Interval Type-2 Fuzzy AHP: A Case Study”, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, Cilt 7(5), 1002-1021, 2014.
- [14] W. Zhou, Z. Xu, M. Chen, “Preference relations based on hesitant-intuitionistic fuzzy information and their application in group decision making”, *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 87, 163-175, 2015.
- [15] J. Hu, K. Xiao, X. Chen, Y. Liu, “Interval type-2 hesitant fuzzy set and its application in multi-criteria decision making”, *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 87, 91-103, 2015.
- [16] M. Yavuz, B. Öztaysi, S. Çevik-Onar, ve C. Kahraman, “Multi-criteria Evaluation of Alternative Fuel Vehicles via a Hierarchical Hesitant Fuzzy Linguistic Model”, *Expert Systems with Applications*, Cilt 42 (5), 2835-2848, 2015.
- [17] B. Öztaysi, S. Çevik-Onar, E. Boltürk, C. Kahraman, “Hesitant Fuzzy Analytic Hierarchy Process”, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Istanbul, 2015.
- [18] C.L. Hwang, ve K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making Methods and Applications: A State of the Art Survey*, USA: Springer-Verlag, 1981.
- [19] S.J. Chen, C.L. Hwang *Fuzzy Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Berlin, Springer-Verlag, ISBN: 978-3-540-54998-7, 1992.
- [20] S. Nadaban, S. Dzitac ve I. Dzitac, “Fuzzy TOPSIS”, *Procedia Computer Science*, Cilt 91, 823-831, 2016.
- [21] M.B. Ayhan, “Fuzzy TOPSIS Application for Supplier Selection Problem”, *International Journal of Information, Business and Management*, Cilt 5(2), 159-174, 2013
- [22] Y. Şahin ve A.A. Supçiller, “Tedarikçi Seçimi İçin Bir Karar Desterk Sistemi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, Cilt 3(2), 91-104, 2015.
- [23] Ö. Uygun ve A. Dede, “Performance Evaluation of Green Supply Chain Management Using Integrated Fuzzy Multi Criteria Decision Making Techniques”, *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 102, 502-511, 2016.
- [24] V. Agrawal, V. Tripathi ve N. Seth, "B-School Selection by Fuzzy TOPSIS and AHP." *Innovative Solutions for Implementing Global Supply Chains in Emerging Markets*, ed. Ashish Dwivedi,

- Hershey, PA., 1-27 (2016), doi:10.4018/978-1-4666-9795-9.ch001
- [25] S-W. Chou ve Y-C. Chang, “The implementation factors that influence the ERP (Enterprise Resource Planning) Benefits”, *Decision Support Systems*, 46(1), 149-157, 2008.
- [26] R.M.Rodriguez, L. Martinez, ve F. Herrera, “A Group Decision Making Model Dealing with Comparative Linguistic Expressions Based on Hesitant Fuzzy Linguistic Term Sets”, *Information Sciences*, Cilt 241, 28-42, 2013.
- [27] S. Kır, H.R. Yazgan, B.Y. Erolan, G. Erbaş ve B. Altuntaş, “Kümeleme Yöntemi İle Oluşturulan İmalat Hücrelerinin Performanslarının Benzetim ve TOPSIS İle Değerlendirilmesi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt 3, 267-282, 2015.
- [28] Ö. Uygun, T.C. Kahveci, H. Taşkın, B. Priştine, “Readiness Assessment Model for Institutionalization of SMEs Using Fuzzy Hybrid MCDM Techniques”, *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 88, 217-228, 2015.
- [29] G. Büyüközkan, O. Feyzioğlu ve O. Nebol, “Selection of the strategic alliance partner in logistics value chain”, *International Journal of Production Economics*, Cilt 113(1), 148-158, 2008.
- [30] M.B. Ayhan “A Fuzzy AHP Approach For Supplier Selection Problem: A Case Study In A Gearmotor Company. *International Journal of Managing Value and Supply Chains*, Cilt.4(3), 11-23, 2013.
- [31] M.B. Ayhan ve H.S. Kılıç “A Two Stage Approach for Supplier Selection Problem in Multi-Item/Multi-Supplier Environment with Quantity Discounts”, *Computers & Industrial Engineering*, Cilt 85, 1-12, 2015.
- [32] J.J. Buckley, “Fuzzy hierarchical analysis”, *Fuzzy Sets Systems*, Cilt 17(1), 233–247, 1985.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 15-09-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 14-11-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.338350	

Geri dönüşüm sektörüne ilişkin sorun alanlarının dematel ve gri dematel yöntemiyle değerlendirilmesi

Feyza Gürbüz*¹ Sümeyye Çavdarıcı²

ÖZ

Geri dönüşüm; doğal kaynaklarımızın tüketimini azaltarak enerji ve hammadde tasarrufu sağlar, iş imkânı olanaklarını arttırır, maliyetleri azaltarak ülke ekonomisine katkıda bulunur. Geri dönüşüm sektöründe ülke olarak oldukça geri seviyelerde olmamızın nedenleri hep tartışma konusu olmuştur. Atık yönetiminde yapılan hataları doğru tespit etmek en uygun stratejiye yönelmemizi sağlayacaktır. Bu çalışmada ülkemizde geri dönüşüm sektörüne ait ve Bilim, Sanayi, Teknoloji Bakanlığınca belirlenmiş olan sorun alanları incelenerek Dematel ve Gri Dematel yöntemleri ile önceliklendirilmiştir. Daha sonra da bu önceliklendirmelere uygun görülen politikalar değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda atık yönetimi konusunda uygulama eksikliklerinin en önemli sorun alanı olduğu belirlenmiş ve sorunun üstesinden gelmek için dikkat edilmesi gereken politikalar sıralanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geri Dönüşüm, Dematel, Gri Dematel

Evaluation of problem areas related to the recycling sector via dematel and grey dematel method

ABSTRACT

Currently, people must make well and clean decisions in difficult living and working conditions. To survive in such a Recycling saves energy and raw materials by reducing the consumption of our natural resources, increases job opportunities and contributes to the country's economy by reducing costs. The reason we are quite back in the recycling sector as a country has always been the subject of debate. Identifying correctly the mistakes made in waste management will provide us to tend the right strategy. In this study, the problem areas identified by T.C. Ministry of Science, Industry and Technology related to recycling sector are prioritized by Dematel and Grey Dematel methods. Then, the policies considered appropriate to these priorities were evaluated. As a result of the study, it has been determined that the lack of implementation in waste management is the most important problem area and the policies that should be paid attention from the top of the problem are listed.

Keywords: Recycling, Dematel, Grey Dematel

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author

¹ Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Müh. Bölümü 38039, Kayseri, feyza@erciyes.edu.tr

² Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Müh. Bölümü 38039, Kayseri, cavdarcisumeyye@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Atık malzemelerin farklı kimyasal ve fiziksel süreçlerden geçerek ikincil hammaddeye dönüştürülmesiyle yeniden üretim süreçlerine dahil edilmesine “geri dönüşüm” denilmektedir [1]. Gün geçtikçe tüketimlerimiz, tüketimlerimiz sonucu atıklarımız ve paralelinde çevre sorunlarımız artmakta. Üretilen atıkların çevre ve insan sağlığı için zararsız hale getirilerek ekonomik bir değere dönüştürülmesi için doğal kaynaklarımızın hızla tüketilmesini engellenmeli ve en önemlisi atıklarımızı doğru yönetmeliyiz. Atık yönetiminin en önemli ayağı geri dönüşüm ve çevresel, sosyal ve ekonomik etkileri olarak bilinmektedir. Atıkların doğru yönetilip geri

dönüşümünü sağlamak için uygun stratejilerin belirlenmesi bu konuya duyarlı teknolojilerin üretilerek uygulanması gerekmektedir. Ayrıca ülke olarak geri dönüşüm sektörüne ilişkin sorun alanlarını iyi tanımlanarak bu sorun alanları üzerine gidilerek sorun olmaktan çıkartılmalıdır.

Günümüzde atıkların “çevreye ve ekonomiye etkileri göz ardı edilen, değersiz, maddi bir külfet olarak algılanıp çöp olarak adlandırmaktan ziyade”, “yeniden değerlendirilip ekonomiye kazandırılabilen, çevre ve ekonomi açısından varlık kavramına çevrilmelidir [2].

T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının hazırlamış olduğu Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planında (2014-2017) [2]. Geri dönüşüm konusu başlı başına ele alınmıştır.

Tablo 1. Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planında belirlenen geri dönüşüm sorun alanları (Recycling problem areas identified in the National Recycling Strategy Document and Action Plan) [2]

GERİ DÖNÜŞÜM SEKTÖRÜNÜN SORUN ALANLARI	
Bilinç Düzeyi ve Farkındalık Sorunu	Atıkların ekonomiye katacağı değer hakkında bilinç eksikliği
	Hane halkının ve sanayicilerin geri dönüşüme yönelik farkındalığının ve çevre bilincinin yetersiz olması
	Sanayicilerin çevre konularını ikinci plana atması
	Atık yönetimine yönelik düzenlenen eğitimlerin yetersizliği
	Bilinç ve farkındalık oluşturma hususunda kamu kurumları-yerel yönetimler-STK'ların yeterli işbirliğini sağlayamaması
İdari ve Hukuki Düzenleme Aksaklıkları	Ekonomik değerleri olan atıkların diğer atıklardan ayrılıp o şekilde toplanmaması
	Mevzuatların talebi ve ihtiyaçları karşılayabilme özelliklerine sahip olmaması
	AB uyumlaştırma sürecinde sektörün masraflarının artmış olup finansal açıdan olumsuz etki altına girmesi
	Mevzuatın etkin biçimde uygulanmaması
	Geri kazanılan ikincil ürünlere ait standartların eksikliği
Altyapı Eksiklikleri	Dönüştürülebilir atık toplama noktalarının yaygın bulunmaması, atıkların olduğu kaynakta ayrı ayrı toplanmaması
	Yerel yönetimlerde teknik ve idari kapasitelerin eksikliği
	Bazı ürün grupları için özel geri dönüşüm tesislerinin bulunması gerekirken bulunmaması ve geri dönüşüm tesislerinin az sayıda olması
Finansman Ve Destekler Hakkındaki Sorunlar	Geri dönüşüm uygulamalarının sanayicilere mali olarak ek yük getirmesi
	Geri dönüştürülebilecek ürünlerin satışlarında karşılaşılan ÖTV problemi
	Atık yönetimi konusunda finansman modelinin bulunmuyor olması
	Teşvik sisteminin ve yönlendirmelerin eksikliği
Atık Yönetimi Hakkında Uygulama Eksiklikleri	Kayıt dışı atık toplamanın ve lisanssız toplanmaların mevcut olması
	Atık yönetimi hususunda uygulanan yaptırım ve cezalandırmaların yetersiz olması ile uygulanan yaptırımların ise istenilen şekilde yürütülememesi,
	Geri dönüşümün etkin hale getirilmesine yönelik kıstasların eksikliği
	Mevzuatın uygulamaya konulmasında personel deneyiminin eksikliği
	Doğru, güvenilir ve güncel istatistiksel verilerin bulunmaması
	Ülkemizin altyapısına uygun hazırlanmamış gerçekçiliği minimum olan yasal uygulamaların oluşu
	Kurumlarda görev dağılımlarının net belirlenmemiş olması ve koordinasyon hususunda eksikliklerin var oluşu

Stratejik planda atık yönetimine dair GFZT (Güçlü, Fırsat, Zayıf, Tehdit)- SWOT analizi mevcuttur. Yapılan GZFT analizi ile tespit edilen zayıf yönlerle tehditleri ele alarak, geri dönüşüm sektöründe sorun olarak görülen başlıklar belirlenmiş ve stratejik plan çalışmasında görevli çalıştay üyelerinin oylamasına sunulmuştur. Bu oylama neticesinde öne çıkan ve müdahale gerektiren sorun alanları ortaya konmuştur. Bu çerçevede geri dönüşüm alanında yaşanan sorunlar Tablo 1'deki gibi belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının Geri dönüşüm sektörüne ilişkin belirlediği sorun alanları DEMATEL, GRİ DEMATEL yöntemleri ile incelenip uygulanması öngörülen politikalar değerlendirildi.

Dünyada üretim-tüketim süreçleri, süreçlerin kalkınmaya etkisi ile çevre sorunları arasındaki ilişki 1970'li yıllardan sonra birçok araştırmaya, kitaba, uluslararası düzeyde toplantıya konu olmuştur. Benzer dönemlerde ülkemizde de çevre kirliliğinin önlenmesi çevre ve sağlık ilişkisi gibi konuların gündeme geldiği görülmektedir. Ancak, çevreyi ve toplumsal yaşamı olumlu etkileme veya

olumsuz etkileri en aza indirme gayesi güden geri dönüşüm davranışlarına ilişkin araştırmaların sayısı ülkemizde oldukça azdır.

Gelişmiş ülkeler incelendiğinde, atıkların %65-55'lik kısmı tümüyle geri dönüştürülerek ekonomiye kazandırılmaktadır [3].

Ülkemizde ise geri dönüşüm oranları hala tam anlamıyla hesaplanamamaktadır. Örneğin T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının hazırlanmış olduğu Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planında (2014-2017) Çevre ve Şehircilik Bakanlığının (ÇSB) verileri yer almaktadır [2]. Tablo 2'de görüldüğü gibi kağıt ve karton için geri kazanım oranı %100 ün üzerine çıkmaktadır. Bu oran matematiksel olarak da mantıksal olarak da kabul edilebilir bir oran değildir ve Strateji planında şu şekilde bir cümle ile açıklanmış; "Ambalaj üretiminde ve ambalajlı olarak piyasaya ürün süren işletmelerin kayıt sistemlerinin tam olmaması nedeni ile; tabloda kağıt ve karton hesaplanan bazı geri kazanımının %100'ün üzerine olduğu görülmektedir."

Tablo 2. 2010 yılı ambalaj ve ambalaj atıklarına ait istatistiksel sonuçlar (Statistical results of 2010 packaging and packaging wastes) [4].

Ambalaj Cinsi	Piyasaya Sürülen Ambalaj Miktarı (ton)	Geri Kazanılan Miktar (ton)	Gerçekleşen Geri Kazanım Oranı (%) [±]
Plastik	812.532	242.039	30
Metal	119.436	64.950	54
Kompozit	67.070	47.502	71
Kağıt Karton	1.024.429	1.423.181	139
Cam	492.626	160.238	33
Toplam	2.516.093	1.937.910	77

Literatürde atık yönetimini ele alan bazı kaynaklar şu şekildedir; Thurgood'a göre atık yönetim sistemlerinin amacı atıkların çevreye zararlı olası etkilerinden arındırılmasıdır. Bu konuda en önemli kriter ise atık yönetim sisteminin sürdürülebilir olmasıdır demiştir [5]. Laustsen sürdürülebilir atık yönetim sistemlerinin temelinde üç yaklaşımın öne çıktığından bahsetmiştir. 3R (Reduce, Re-use, Recycle) yaklaşımı olarak tanımlanan bu hiyerarşiye göre öncelikli olarak atık maddelerin azaltılması için çalışılmalı, sonrasında bu maddelerin yeniden kullanılmasını, son olarak bu maddeler atıkların geri dönüştürülmesi ile ekonomiye yeniden kazandırılmalıdır görüşlerini savunmuştur [6]. Matsumoto'ya göre uygulanması

arzu edilen bir diğer yöntem ise söz konusu ürünlerin yeniden kullanılmasıdır demiştir. Örneğin, ikinci el ürünlerin satın alınması (İkinci el kitap, Bilgisayar vs.) sürecin bu aşamasına örnek olarak verilebilir. Bu iki aşamadan geçen ve halen ekonomiye kazandırılmayan ürünler için ise geri dönüşüm kavramı gündeme gelmektedir. Demografik ve sosyo-ekonomik faktörlerin atık geri dönüşüme verilen destek üzerinde etkili olduğu görülmektedir [7]. Saphores vd., gözlemlerine göre kadınlar, erkeklere; üst gelir grubundaki bireyler, alt gelir grubundaki bireylere; Owens vd., eğitim ve öğretim düzeyi yüksek olan bireylerin daha düşük olan bireylere kıyasla geri dönüşüm faaliyetlerine daha fazla destek vermekte

olduğu ve daha yüksek oranda geri dönüştürme fikrini uygulamaya geçirdiği görülmektedir demiştir [8]. Werner vd.'nin daha yaşlı bireylerin geri dönüşüm uygulamalarına daha fazla destek verdikleri hipotezi ise reddedilmiştir [9]. Kelly'nin öncülüğündeki çalışmada, Massey Üniversitesi'ndeki 1400 öğrenci ve akademik personel üzerine yürüttükleri çalışmalarında üniversite öğrencilerinin ve akademisyenlerinin geri dönüşüme genel anlamda olumlu baktıkları sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca görünürlüğü artırılmış olan geri dönüşüm kutularının üniversitede geri dönüşüm oranını ciddi ölçüde artırabileceği sonucuna ulaşmışlardır [10]. Malakahmad ise yürüttükleri çalışmalarında akademisyen ve öğrencilerin % 80'nin geri dönüşüme destek vermek istedikleri ancak sadece %53'ünün bu fikri uygulamaya geçirebildiği sonucuna ulaşmışlardır. Katılımcıların %83'ü geri dönüşüm noktalarının yetersizliği, %75'i ise geri dönüştürülecek materyal ile uyumlu olmayan geri dönüşüm kutuları nedeniyle geri dönüşümü gerçekleştiremedikleri vurgulanmıştır [11]. Kaplowitz vd. ABD'deki 10 büyük üniversitede yürüttükleri çalışmalarında hangi ürünlerin geri dönüştürülebilir olduğu, nasıl ve nerede geri dönüşüme katkı sağlanabileceğinin bireylere anlatılması durumunda geri dönüşüme olan desteğin önemli ölçüde artacağı sonucuna ulaşmışlardır [12]. Elfithri vd. Kebangsaan Malaysia Üniversitesi'nde yürüttükleri analizlerde akademisyenlerin ofislerinde bulundurulmuş geri dönüşüm kutularının geri dönüşüm oranını artırdığı yönünde bulgulara ulaşmışlardır [13]. Pike vd. Francis Marion Üniversitesi üzerine yürüttükleri bir çalışmada öğrencilere geri dönüşüm faaliyetleri konusunda verilen eğitimlerin geri dönüştürülen materyallerin yüzdesi üzerinde etkili olmadığı ancak öğrencilere verilen geri dönüşüm kutularının geri dönüştürülen materyallerin yüzdesini önemli ölçüde artırdığı sonucuna ulaşmışlardır [14]. Smyth ise University of Baja California (UABC) üniversitesinde yürütülen bir çalışmada günlük atık miktarının 1 ton olduğu ve bu atıkların %65'inin geri dönüştürülebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır [15].

Son yıllarda Dematel metodunun uygulandığı problemlere göz atılacak olursa;

Türker vd. üniversitelerin bölümlerinin verimliliklerini tespit etmede yer alan kritik başarı faktörlerini bulanık Dematel yöntemi ile belirlemişlerdir [16]. Karaatlı vd. performans

değerlemede Dematel ve bulanık Topsis uygulaması yapmışlardır [17]. Sadegh Javan vd. ticari ortamda bankacılık zorluklarının Dematel tekniğini kullanılarak analizini yapmışlardır[18]. Ilker vd. kablo üretiminde tedarikçileri belirlemek için bütünleşik Dematel -AAS-Vikor yöntemini kullanmışlardır [19]. Özveri vd. Dematel ile bütünleşik ağ tasarımı yöntemiyle hizmet tedarik zincirinin performansının değerlendirilmesini yapmışlardır [20]. Etöz, Düğenci Fuzzy DEMATEL yöntemi ile ERP'nin başarılı uygulanmasında etkili kritik başarı faktörlerinin belirlemişlerdir [21]. Altan vd. lojistik firma belirlemek için bulanık Dematel ve bulanık TOPSIS yöntemleri ile bütünleşik bir model kurmuşlardır [22]. Bali vd. 3PL tedarikçi belirlemede fuzzy Dematel ve fuzzy TOPSIS ile çok kriterli karar verme çalışmasını yapmışlardır [23]. Eroğlu, Bakım-Onarım faaliyetlerinde bulanık Dematel ve Smaa-2 yöntemleriyle değerlendirilme yapmıştır [24]. Eroğlu'nun bu çalışmada yer literatür incelemesine oldukça uzun yer vermiştir. Zhongmin ve Xizu, gri sistem teorisinin avantajlarını sistem analizi konusunda kullanmışlardır. Aralık gri sayılar kullanıldığı takdirde çok amaçlı çözüm üretebilecek şekilde bir ağ yapısı oluşturup, bu yapıyla kritik yol tespiti yapılabileceğini, nitel ve nicel faktörlerin beraber çözümlenebileceği göstermişlerdir [25]. Tseng ise, hizmet kalitesini ölçüp arttırmak için geliştirdiği bir karar verme sürecine gri DEMATEL metodu ile çözüm aramıştır. İlk olarak üçgensel bulanık sayılarla oluşturduğu alternatifler ve ölçüt ağırlıklarını belirlemiştir. İkinci aşamada, bütün alternatiflerin sıralı olması için gri olasılık derecelerini tanımlamış. Üçüncü aşamada Dematel ile bu kıstaslar arasındaki bağılıkları belirlemiş, dördüncü ve son aşamada ise müşteri beklentileri yönünden en iyi hizmet kalitesi araçlarını belirlemiş ve seçimini yapmıştır [26]. Arkasından Bai, Sarkis [27] ve Dou, Sarkis [28], Tseng gibi aralık gri sayılarla Dematel uygulaması yapmışlardır. Son yıllarda ise Liang, H., Ren, J., Gao, Z., Gao, S., Luo, X., Dong, L., Scipioni, A., gri Dematel uygulaması yapmıştır [29]. Büyüközkan ve Güteryüz [30] Türkiye için bir yatırımcı bakış açısıyla en uygun yenilenebilir enerji kaynaklarının seçiminde ANP ve Dematel yöntemlerini kullanmıştır. Şahin ve Hatunoğlu [31] çalışmalarında örnek bir birey grubunun geri dönüşüme yönelik algı düzeylerini ortaya koyarak, geri dönüşümün muhasebeleştirilmesi sürecini açıklamışlardır.

Bu çalışmada da önce Dematel metodu ile çözüm bulunmaya çalışılıp alternatif olarak ise son yıllardaki çalışmalar gibi gri sayılar Dematel uygulamasına entegre edilip bir başka çözüm geliştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri (Multi-Criteria Decision Making)

Birden fazla kriter olup karar verilmesi gereken problemlerde çok kriterli karar verme metodları yol gösterici olmaktadır [32]. Kararların verilmesi ile ilgili yöntemlerin araştırılması her daim güncelliğini korumuştur [33]. Karar verme süreci, eldeki verilerin, karar verenlerin görüşü ve kararın amacı gereği bir alternatifi seçip alternatiflerin sıralanmasını içerir [34].

Problemlerin doğasına en uygun kararlar verebilmek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kriterler açısından geri dönüşüm sektörünün sorun alanları arasında bir

sıralama yapabilmek için Dematel–Gri Dematel metodları uygun görülmüştür.

2.2. Dematel Metodu (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory Method)

Dematel karışık problemleri çözmeye kullanılmak amacıyla Cenevre Battelle Memorial Enstitüsü, Bilim ve İnsan İlişkileri programınca 1972 ve 1976 yılları arasında ortaya konulmuştur [35-36].

Dematel metodu literatürdeki kullanımları incelendiğinde genellikle 5 adımdan oluşmaktadır. Yalnız Eroğlu (2004) 6. Adım olarak kriter ağırlıklarının belirlenmesini ilave etmiştir. Dematel yönteminin aşamaları aşağıda açıklanmıştır.

Adım 1: Direk ilişki matrisi D'nin oluşturulması

Uzman gruptan Tablo 3'te belirlenen skalalara göre; "Kriterler birbirlerini hangi düzeyde etkiliyorlar?" sorusuna cevap vermesi istenir ve Tablo 4'te verilen örnekteki gibi n*n boyutunda bir matris elde edilir.

Tablo 3. Kriterleri Karşılaştırma Skalası (Criteria Comparison Scale) [37].

Sayısal Değer Tanımı	
0	Etkisi Yok
1	Etkisi Az
2	Etkisi Orta
3	Etkisi Çok
4	Etkisi Çok Fazla

Tablo 4. Direkt İlişki Matrisi Örneği (Direct Relationship Matrix Example)

	Kriter 1	Kriter 2	Kriter 3	Kriter 4	Kriter 5
Kriter 1	0	3	1	1	1
Kriter 2	2	0	1	1	1
Kriter 3	1	1	0	2	3
Kriter 4	4	3	2	0	2
Kriter 5	1	2	4	1	0

$$X = \begin{bmatrix} 0 & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & 0 & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Oluşturulan X direkt ilişki matrisleri eşitlik (2) kullanılarak aritmetik ortalamaları alınarak ve ortalama direkt ilişki matrisi (A) elde edilir. Elde edilen bu matris aynı zamanda karar verici uzman grubun kararıdır.

$$a_{ij} = \frac{1}{H} \sum x_{ij} \quad (2)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Adım 2: Normalleştirilmiş direkt-ilişki matrisi D'nin oluşturulması 4 ve 5 nolu eşitlikleri ve Direkt-ilişki matrisi (A) kullanılarak normalleştirilmiş direkt-ilişki matrisi (D) bulunur. D matrisinde köşegen değerleri 0 olmalıdır ve diğer değerler 0 ve 1 arasında yer almalıdır.

$$S = \max \left(\max \sum_{j=1}^n a_{ij}, \max \sum_{i=1}^n a_{ij} \right) \quad (4)$$

$$D = \frac{A}{S} \quad (5)$$

Adım 3: Toplam ilişki matrisi T'nin belirlenmesi Normalleştirilmiş direkt-ilişki matrisi (D) elde edildikten sonra 6 eşitliğinin eşdeğeri 7 eşitliği kullanılarak toplam ilişki matrisi (T) türetilir [39-40].

$$T = D + D^2 + D^3 + \dots \\ = \sum_{i=1}^{\infty} D^i \quad (6)$$

$$T = D(I - D)^{-1} \quad (7)$$

Adım 4: Toplam direkt ilişki matrisi T'nin satır toplamı R ve sütun toplamı C'nin belirlenmesi

$$R_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (8)$$

$$C_j = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad (9)$$

R+C değeri her bir kriterin diğer kriterle arasındaki pozitif veya negatif ilişkiyi, R-C değeri ise kriterlerin sisteme olan net etkisini gösterir.

Adım 5: Eşik değerinin belirlenerek ve etki-yönlü graf diyagramının çizilmesi

Etki-yönlü graf diyagramı yatay ekseninde R+C, dikey ekseninde R-C olan bir koordinat düzleminde (R+C, R-C) noktalarının gösterilmesiyle elde edilir.

Kullanılacak eşik değerinin değeri (büyüklüğü veya küçüklüğü) kriterler arasındaki ilişkiyi etkileyebilmekte ve çözümün basit veya çok daha karmaşık olmasını sağlar.

Eroğlu Adım 6 olarak kriter ağırlıklarını belirlemekte aşağıdaki eşitlikleri kullanılmasını öngörmüştür [25].

$$w_i = \sqrt{[R_i + C_i]^2 + [R_i - C_i]^2} \quad (10)$$

$$w_i \\ = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (11)$$

2.3. Gri Sistemler (Grey Systems)

Gri sistemler örneklemelerin küçük olduğu ve bilginin yetersiz olduğu problemler için geliştirilmiştir. Konu hakkında fazla tecrübenin bulunmadığı, gerekli verilerin temin edilemediği durumlarda gri sistem teorisi memnun edecek sonuçlar verebilir [41].

Gri kelimesi kesin olmayan ve eksik olan bilgilerin yer aldığı problemlerde kullanılır. Sistemlerin beyaz, gri ve siyah olma durumları farklı açılardan karşılaştırılmalı olarak Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Siyah, Gri ve Beyaz Sistemlerin Karşılaştırılması (Comparison of Black, Gray and White Systems) [41].

	Siyah	Gri	Beyaz
Bilgi	Bilinmiyor	Tam değil	Biliniyor
Görünüm	Karanlık	Gri	Parlak
Süreç	Yeni	Geçiş aşamasında	Eski
Özellik	Keşmekeş	Kompleks	Düzenli
Yöntem	Olumsuz	Değişken	Olumlu
Davranış	Hoşgörü	Tolerans	Katı
Sonuç	Sonuç yok	Birden fazla çözüm	Tek çözüm

Gri teoriler temelde sistemler arası ilişkinin analizinin yapılması, model kurulumu, tahmin yapma ve karar problemlerinde oldukça sık kullanılan yöntemlerden biridir [42]. Gri sistem teorisini gri karar verme, gri kontrol, gri tahminleme, gri üretim, gri modelleme ve gri ilişki analizi olmak üzere altı ana başlıkta incelemek mümkündür [43].

Gri sistem analizi gri sayılar, gri eşitlikler ve/veya gri matrislerle yapılır. Gri sayılar deyince ne siyah ne beyaz olarak arada bir kavram düşünülebilir, değerleri tam olarak sayılarla net ifade edilemeyen ama hangi aralık içinde değer almasının bilindiği sayılardır. Bir alt ve bir üst değere sahip bu sayılar aralık gri sayılar olarak adlandırılabilirler ve $\otimes_1 \in [\underline{a}, \bar{a}]$ ile ifade edilirler. Burda da \otimes gri sayısının alt limit değerini " \underline{a} ", üst limit değerini ise " \bar{a} " ifade eder.

$\otimes_1 \in [a, b]$, $a < b$ ve $\otimes_2 \in [c, d]$, $c < d$ olmak üzere \otimes_1 ve \otimes_2 gri sayıları ile yapılabilen basit 4 işlem de bazı kurallar belirlenmiştir. Bunlar;

- ❖ Toplama : $\otimes_1 + \otimes_2 = [a+c, b+d]$.
- ❖ Çıkartma : $\otimes_1 - \otimes_2 = [a-d, b-c]$.
- ❖ Çarpma : $\otimes_1 * \otimes_2 = [\min \{ac, ad, bc, bd\}, \max \{ac, ad, bc, bd\}]$.
- ❖ Bölme: $\otimes_1 / \otimes_2 = [\min \{a/c, a/d, b/c, b/d\}, \max \{a/c, a/d, b/c, b/d\}]$.

\otimes gri sayısının k sayısı ile skaler çarpımında alt sınır ve üst sınır k ile çarpılır kuralı şu şekildedir;

- ❖ Skaler Çarpım Kuralı: $\otimes \in [a, b]$, $a < b$ ve k pozitif gerçekte iken $k * \otimes = [ka, kb]$ şeklinde hesaplanır [44].

Gri sistemlerde ikili karşılaştırma matrisleri hazırlanırken uzman gruplar Tablo 6'de verilen gri sayılar gibi sayılar kullanılır.

Tablo 6. Kriter Ağırlıkları için kullanılan skala (Scale used for Criterion Weights) [26].

Dilsel İfade	Gri Sayı
Etkisi Yok	[0,0].
Etkisi Az	[0,1].
Etkisi Orta	[1,2].
Etkisi Çok	[2,3].
Etkisi Çok Fazla	[3,4].

2.4. Gri Dematel (Grey Dematel)

Gri Dematel yöntemi kriter değerlendirmede kullanılan gri sayılardan ötürü gri olarak ifade edilmiştir. Dematel metodunu anlatırken kullanılan adımların aynısı gri Dematel için de geçerlidir fakat gri sayılarla yapılan işlemler bakımından fark göstermektedir.

Adım 1: Gri sayılardan oluşan veriler ile direkt ilişki matrisi A'nın elde edilmesi

Gri sistemlerde ikili karşılaştırma matrisleri ($\otimes_{a_{ij}}$ [\underline{a}_{ij} , \bar{a}_{ij}]; $i= 1, 2,3,\dots m,$; $j= 1, 2,3,\dots n,$) gibi gri sayıları kullanarak 3.12’de gösterildiği gibi oluşturulur.

$$A^k = \begin{bmatrix} [0,0] & \otimes a_{12} & \dots & \otimes a_{1n} \\ \otimes a_{21} & [0,0] & \dots & \otimes a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \otimes a_{n1} & \otimes a_{n2} & \dots & [0,0] \end{bmatrix} \quad (12)$$

Adım 2: Normalleştirilmiş gri direkt-ilişki matrisi $\otimes D$ ’nin elde edilmesi

Aşağıdaki 13 ve 14 numaralı eşitlikleri kullanılarak Direkt-ilişki matrisi (A)’dan normalleştirilmiş direkt-ilişki matrisi ($\otimes D$) bulunur.

$$S = \max\left(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}^+, \max_{1 \leq j \leq n} \sum_{i=1}^n a_{ij}^+\right) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \otimes D &= [\otimes d_{ij}]_{n \times n} = [d_{ij}^-, d_{ij}^+]_{n \times n} \\ &= \frac{\otimes A}{S} \end{aligned} \quad (14)$$

Adım 3: Toplam ilişki matrisi T’nin elde edilmesi

Aşağıdaki 15-19 numaralı eşitlikler kullanılarak Toplam ilişki matrisi $\otimes T$ elde edilir.

$$\begin{aligned} \otimes T &= [\otimes t_{ij}]_{n \times n} = [t_{ij}^-, t_{ij}^+]_{n \times n} \\ &= \otimes D \\ &\quad + (\otimes D)^2 + \dots + (\otimes D)^\infty \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} T^- &= [t_{ij}^-]_{n \times n} \\ &= D^-(I \\ &\quad - D^-)^{-1} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} T^+ &= [t_{ij}^+]_{n \times n} \\ &= D^+(I \\ &\quad - D^+)^{-1} \end{aligned} \quad (17)$$

$$D^+ = [d_{ij}^+]_{n \times n} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} D^- &= [d_{ij}^-]_{n \times n} \end{aligned} \quad (19)$$

Adım 4: Toplam direkt ilişki matrisinden satır toplamı $\otimes R$ ve sütun toplamı $\otimes C$ ’nin belirlenmesi

$$\otimes R_i = \sum_{j=1}^n \otimes t_{ij} \quad (20)$$

$$\otimes C_j = \sum_{i=1}^n \otimes t_{ij} \quad (21)$$

Gri Dematel yönteminde kriter ağırlıkları $\otimes R_i + \otimes C_i$ ’ye göre belirlenmiştir [29].

Adım 5: Eşik değerinin ayarlanması ve etki-yönlü graf diyagramının oluşturulması

Bu adım sonuçları görselleştirmeyi amaçlar, literatürde bazı çalışmalarda uygulanmış bazılarında uygulanmamıştır. Dematel metodu uygulamasında etki yönlü graf çizilerek etkiler görsel olarak görüldü. Gri Dematel de de benzer bir graf ortaya çıkacaktır.

3. BULGULAR (FINDINGS)

3.1. Dematel Sonuçları (Dematel Results)

Bu çalışmada atık yönetimi konusunda eksiklikler değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmede çevre mühendislerinden (Çevre Bakanlığında çalışan ve Çevre mühendisliği öğretim üyelerinden) oluşan 5 kişilik bir uzman grup belirlendi. Görüşleri her birine direkt ilişki matrisine doldurmaya yönelik anket soruları ile alındı. Kriterlerimizin kendi aralarındaki bağımlılıkları ise Dematel yöntemi kullanılarak incelendi.

▪ Kriterlerin Belirlenmesi

Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planında (2014-2017) [2] çalıştay katılımcılarının oylaması ile belirlenen sorun alanları 5 kriter olarak (C_i) belirlenmiştir. Bunlar;

1. Bilinç Düzeyi ve Farkındalık: Atık yönetimde bilinçsizlikler ve farkında olunmayan davranışları tanımlar (C_1).

2. İdari ve Hukuki Düzenlemeler: Atık yönetimde İdari ve Hukuki Düzenlemeler yönünden eksiklikleri tanımlar (C_2).

3. Altyapı: Atık yönetiminde altyapı eksikliklerini tanımlar (C₃)

4. Finansman ve Destek: Atık yönetiminde sağlanan Finansman ve Desteklerin eksiklikleridir (C₄)

5. Uygulama: Atık yönetiminde uygulama konusundaki eksiklikleri tanımlar (C₅)

Bölüm 2 de bahsi geçen tüm indis ve değişkenlerin tanımı Tablo 7’de toplu olarak verilmiştir.

Tablo 7. Kullanılan indis ve değişkenlerin tanımı (Definition of indices and variables used)

Notasyon	Anlamı
X	n*n boyutunda Kriterler arası ilişkiyi gösteren matris direkt ilişki matrisi
X _{ij}	i.Kriter ile j. Kriter arasındaki ilişkiyi ifade eden değer
H	Kaç adet X direkt ilişki matrisi örnekleme alındığı
A	Ortalama direkt ilişki matrisi
a _{ij}	i.Kriter ile j. Kriter arasındaki ilişkiyi ifade eden H tane değer
D	Ortalama direkt ilişki matrisinin normleştirilmiş hali
S	Ortalama direkt ilişki matrisinin satır ve sütun elemanlarının değerce en büyük olan elemanı
T	D normleştirilmiş direkt ilişki matrisi kullanılarak hazırlanan Toplam ilişki matrisi
t _{ij}	Normleştirilmiş direkt ilişki matrisinin i.satır j.sütun elemanı
I	Birim Matris
R _i	Toplam direkt ilişki matrisi T’nin satır toplamı (Etkileyen Faktör)
C _j	Toplam direkt ilişki matrisi T’nin sütun toplamı (Etkilenen Faktör)
w _{ij}	R _i ve C _j kriterlerinin ağırlıklı ortalaması
⊗ ₁	[a, ā] şeklinde ifade edilen gri sayı gösterimi
a	⊗ gri sayısının alt limit değeri
ā	⊗ gri sayısının üst limit değeri
C _i	Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planında belirlenen geri dönüşüm sorun alanları
C _i C _j	ci. kriterin cj. Kriter arasındaki ilişkinin gri sayı karşılığı
A ^k	Gri sayılardan oluşan direkt ilişki matrisi
⊗D (D ⁻ ,D ⁺)	Normleştirilmiş gri direkt ilişki matrisi
⊗T (T ⁻ ,T ⁺)	Gri Dematel Toplam İlişki Matrisi
⊗R	Gri Toplam direkt ilişki matrisi T’nin satır toplamı (Etkileyen Faktör)
⊗C	Gri Toplam direkt ilişki matrisi T’nin sütun toplamı (Etkilenen Faktör)

Tablo 8. Örnek Dematel soru şablonu (Sample Dematel question template)

Soru 1- Bilinç Düzeyi ve Farkındalığın İdari ve Hukuki Düzenlemelere etkisi				
Soru 2- İdari ve Hukuki Düzenlemelerin Altyapıya (geri dönüşüm altyapısına) etkisi				
Soru 3-Altyapının (geri dönüşüm altyapısının) Finansman ve Desteklere etkisi				
Etkisi Yok(0)	Etkisi Düşük (1)	Etkisi Orta (2)	Etkisi Yüksek (3)	Etkisi Çok Yüksek (4)

Her bir uzmanın verdiği yanıtlar çerçevesinde Tablo 9’de yer alan örnekteki gibi değerlendirme tabloları elde edilmiştir.

▪ Anket ve veri toplama

Bu değerlendirmede çevre mühendislerinden oluşan uzman bir grup belirlenmiş ve Tablo 8’deki gibi 5 kriterin birbirleri üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir.

Tablo 9. Örnek Dematel değerlendirme tablosu (Sample Dematel evaluation chart)

C₁C₂	C₁C₃	C₁C₄	C₁C₅
2,00	3,00	3,00	4,00
C₂C₁	C₂C₃	C₂C₄	C₂C₅
3,00	4,00	3,00	4,00
C₃C₁	C₃C₂	C₃C₄	C₃C₅
2,00	2,00	1,00	4,00
C₄C₁	C₄C₂	C₄C₃	C₄C₅
2,00	2,00	4,00	4,00
C₅C₁	C₅C₂	C₅C₃	C₅C₄
2,00	2,00	1,00	2,00

Veriler toplandıktan sonra Dematel adımları uygulamaya konulmuştur.

Adım 1: Direkt ilişki matrisinin oluşturulması

Uzmanların uygun gördükleri puanların aritmetik ortalaması alınarak Tablo 10’da görülen “Direkt İlişki Matrisi” oluşturulmuştur. Tablo 10’un her bir satırının toplamı ile her bir sütun toplamının en

büyük değeri olan “C₂: İdari ve Hukuki Düzenlemeler” satırına ait olan 14,00 değeri “s değeri” olarak kullanılmıştır.

Adım 2: Normalleştirilmiş direkt-ilişki matrisi belirlenmesi: Tablo 11’de verilen normalleştirilmiş direct ilişki matrisi bulunmuştur.

Tablo 10. Direkt İlişki Matrisi (Direct Relationship Matrix) (A)

Kriterler	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	Toplam
C₁	0,00	1,00	1,50	1,75	3,00	7,25
C₂	3,25	0,00	3,75	3,25	3,75	14,00
C₃	2,25	1,50	0,00	1,75	3,25	8,75
C₄	3,00	2,50	3,50	0,00	3,75	12,75
C₅	2,50	2,50	2,00	2,00	0,00	9,00
Toplam	11,00	7,50	10,75	8,75	13,75	

Tablo 11. Normalleştirilmiş direkt-ilişki matrisi (Normalized direct-relation matrix) (D)

Kriterler	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅
C₁	0,00	0,07	0,11	0,13	0,21
C₂	0,23	0,00	0,27	0,23	0,27
C₃	0,16	0,11	0,00	0,13	0,23
C₄	0,21	0,18	0,25	0,00	0,27
C₅	0,18	0,18	0,14	0,14	0,00

Adım 3: Toplam ilişki matrisi (T) Tablo 12’de verildiği gibi bulunmuştur.

Tablo 12. Toplam İlişki Matrisi (Total Relationship Matrix) (T)

Kriterler	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	0,30	0,30	0,39	0,36	0,54
C ₂	0,74	0,40	0,74	0,63	0,87
C ₃	0,50	0,36	0,34	0,40	0,62
C ₄	0,68	0,52	0,68	0,41	0,82
C ₅	0,53	0,43	0,49	0,44	0,46

“Toplam İlişki Matrisi” ortalaması alınarak eşik değeri belirlenmiştir. Eşik değeri 0,52 dir. Eşik değerinden büyük matris elemanları Tablo 9’de zemini koyu renklendirilmiştir.

Eşik değerinin belirlenmesi uzman gruba bırakılabildiği gibi Toplam ilişki matrisinin ortalaması alınarak da belirlenebilir. Biz Toplam

ilişki matrisinin ortalamasını alarak belirlemeyi tercih ettik.

Adım 4: Toplam direkt ilişki matrisinden satır toplamı R ve sütun toplamı C’nin belirlenmesi: Sonuçlar Tablo 13’de verilmiştir.

Tablo 13. Etkileyen ve Etkilenen Faktörlerin Grupları (Groups of Affecting and Affected Factors)

KRİTERLER	R	C	R+C	R-C
Bilinç Düzeyi ve Farkındalık	1,89	2,75	4,63	-0,86
İdari ve Hukuki Düzenlemeler	3,38	2,01	5,39	1,38
Altyapı	2,22	2,63	4,86	-0,41
Finansman ve Destek	3,10	2,24	5,34	0,87
Uygulama	2,34	3,32	5,66	-0,97

C₂ (İdari ve Hukuki Düzenlemeler) ve C₄ (Finansman ve Destek) Kriterlerinin **R-C değerleri pozitif** yani sistemi etkileyen konumdadır. C₁ (Bilinç Düzeyi ve Farkındalık), C₃(Altyapı) ve C₅ (Uygulama) kriterlerinin R-C değeri ise negatiftir ve etkilenenler olarak isimlendirilebilirler.

Adım 5: Eşik değerinin belirlenerek ve etki-yönlü graf diyagramının oluşturulması

Etkilenen-etkileyen kriter grupları ve eşik değerine göre elde edilen etki-yönlü graf ise Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Etki-Yönlü Graf Diyagramı

Şekil 1’de görüldüğü gibi geri dönüşüm sektöründe idari, hukuki düzenlemeler ve finansman, destekler diğer kriterleri etkileyen konumdadır. Bu sonuçtan çözümümüzün gerçekçi olduğunun yorumuna varabiliriz. Bir konuda herhangi bir kanuni, idari bir hüküm olması ve finanse edilmesi, desteklenmesi o konuda aşama kaydetmemizi sağlayacaktır.

R,C değerleri belirlendikten sonra kriter ağırlıkları $w_i = \sqrt{[R_i + C_i]^2 + [R_i - C_i]^2}$ formülü ile hesaplanır ve sisteme olan etkisini sayısal olarak görebilmemize yardımcı olur.

Son olarak kriter öncelikleri belirlenir. İlgili formüller ve hesaplamalar yöntem açıklamasında yer aldığı gibi Tablo 14’te de görülmektedir.

Tablo 14. Kriter Ağırlıkları Tablosu (Criterion Weights Table)

KRİTERLER	Kriter Ağırlıkları $w_i = \sqrt{[R_i + C_i]^2 + [R_i - C_i]^2}$	Kriter Ağırlıkları $w_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$	Kriter Öncelikleri
Bilinç Düzeyi ve Farkındalık	4,71	0,179	5
İdari ve Hukuki Düzenlemeler	5,56	0,211	2
Altyapı	4,87	0,185	4
Finansman ve Destek	5,41	0,206	3
Uygulama	5,75	0,218	1
TOPLAM	26,3	1	

Dematel metodu sonucuna göre geri dönüşüm sektöründe **Uygulama** eksikliklerinin önemi diğer kriterlere göre daha önemlidir. Uygulama konusundaki eksiklikleri ise sırasıyla İdari ve Hukuki Düzenlemeler, Finansman ve Destek, Altyapı ve Bilinç Düzeyi ve Farkındalık konularındaki eksiklikler takip etmektedir.

3.2. Gri Dematel Yönteminin Uygulanması

Gri DEMATEL uygulamasında DEMATEL metodu ile aynı adımlar takip edilir fakat gri sayılarla işlem yapılacağından ötürü işlem farklılıkları göz önünde bulundurulur.

Adım 1: Direk ilişki matrisinin oluşturulması

Tablo 15’de görülen “Gri Sayılarla Oluşturulmuş Direkt İlişki Matrisi” Çevre Mühendislerinden oluşan uzman grubun verdiği puanlamaların aritmetik ortalamasıdır.

Tablo 15. Gri Dematel Direk İlişki Matrisi (Gray Dematel Direct Relationship Matrix) (A)

Kriterler	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	[0,0]	[0,1]	[1,2]	[1,2]	[2,3]
C ₂	[2,3]	[0,0]	[3,4]	[2,3]	[3,4]
C ₃	[2,3]	[1,2]	[0,0]	[1,2]	[2,3]
C ₄	[2,3]	[2,3]	[3,4]	[0,0]	[3,4]
C ₅	[2,3]	[2,3]	[2,3]	[2,3]	[0,0]

Adım 2: Normalleştirilmiş gri direkt-ilişki matrisi belirlenmesi ($\otimes D$)

13 ve 14 eşitlikleri Direkt-ilişki matrisi (A) üzerinde uygulanarak normalleştirilmiş direkt-ilişki matrisi ($\otimes D$) Tablo 16’da verildiği gibi elde edilmiştir.

Tablo 16. Gri Dematel Normalleştirilmiş direkt-ilişki matrisi (Gray Dematel Normalized direct-relation matrix)($\otimes D$)

Kriterler	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	0,0 00 0	0,0 00 0	0,0 00 0	0,0 01 4	0,1 01 4
C ₂	0,1 42 9	0,2 14 3	0,0 00 0	0,2 14 3	0,2 02 7
C ₃	0,1 42 9	0,2 14 3	0,0 00 0	0,0 00 4	0,0 00 9

C ₄	0,1 42 9	0,2 14 3	0,1 42 9	0,2 14 3	0,2 14 3	0,2 85 7	0,0 00 0	0,0 00 0	0,2 14 3	0,2 14 7
C ₅	0,1 42 9	0,2 14 3	0,1 42 9	0,2 14 3	0,1 42 9	0,2 14 3	0,1 42 9	0,2 14 3	0,0 00 0	0,0 00 0

Adım 3: Toplam ilişki matrisi T’nin elde edilmesi (T^-, T^+)

Gri sayılar aralık olarak belirtildiğinden dolayı Toplam ilişki matrisi hesaplanırken Dematel’deki gibi bir değil iki adet değer Tablo 17 ve Tablo 18’de verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 17. Gri Dematel Toplam İlişki Matrisi (Gray Dematel Total Relation Matrix) (T^-)

Kriterler	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	0,0784	0,0594	0,1476	0,1268	0,2150
C ₂	0,3081	0,1211	0,3755	0,2654	0,3948
C ₃	0,2375	0,1381	0,1158	0,1529	0,2557
C ₄	0,3081	0,2461	0,3755	0,1404	0,3948
C ₅	0,2760	0,2235	0,2878	0,2408	0,1800

Tablo 18. Gri Dematel Toplam İlişki Matrisi (Gray Dematel Total Relation Matrix) (T^+)

Kriterler	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
C ₁	0,5758	0,5241	0,7267	0,6168	0,8194
C ₂	1,1089	0,7312	1,2027	0,9729	1,2679
C ₃	0,8686	0,6651	0,7222	0,7162	0,9498
C ₄	1,1089	0,9077	1,2027	0,7964	1,2679
C ₅	0,9990	0,8203	1,0402	0,8791	0,9225

Adım 4: Toplam direkt ilişki matrisinden satır toplamı $\otimes R$ ve sütun toplamı $\otimes C$ ’nin elde edilmesi: Sonuçlar Tablo 19’da verilmiştir.

Tablo 19. Gri Dematel Etkilenen ve Etkileyen Faktör Grupları (Factors Affecting and Affected for Gray Dematel)

Kriterler	$\otimes R$	$\otimes C$	$\otimes R_i + \otimes C_i$	$\otimes R_i - \otimes C_i$
C ₁	0,6272	3,2627	1,8354	7,9238
C ₂	1,4649	5,2836	2,2532	8,9320
C ₃	0,9000	3,9219	2,2024	8,8164
C ₄	1,4649	5,2836	2,3912	9,2650
C ₅	1,2082	4,6611	2,6485	9,8887

R,C değerleri belirlendikten sonra kriter ağırlıkları Dematel yönteminde $w_i = \sqrt{[R_i + C_i]^2 + [R_i - C_i]^2}$ eşitliği ile hesaplanırken literatürdeki GRİ Dematel uygulamalarında $\otimes R_i + \otimes C_i$ ile

belirlenmiştir [44]. Tablo 20’de hesaplamalardan da görüldüğü gibi iki değer zaten bir biri ile orantılıdır.

Tablo 20. Gri Dematel Kriter Ağırlıkları Tablosu (Gray Dematel Criterion Weights Table)

KRİTERLER	Kriter Ağırlıkları $\otimes R_i + \otimes C_i$	Kriter Ağırlıkları $w_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$	Kriter Öncelikleri
Bilinç Düzeyi ve Farkındalık	9,7592	0,1738	5
İdari ve Hukuki Düzenlemeler	11,1852	0,1992	3
Altyapı	11,0188	0,1962	4
Finansman ve Destek	11,6562	0,2076	2
Uygulama	12,5372	0,2233	1
TOPLAM	56,1565	1	

Gri Dematel metodu sonucuna göre de geri dönüşüm sektöründe Dematel sonucunda olduğu gibi **Uygulama** eksikliklerinin önemi diğer kriterlere göre daha önemlidir. Uygulama

konusundaki eksiklikleri ise sırasıyla Finansman ve Destek, İdari ve Hukuki Düzenlemeler, Altyapı ve Bilinç Düzeyi ve Farkındalık konularındaki eksiklikler takip etmektedir (Tablo 21).

Tablo 21. Dematel – Gri Dematel Kriterler Öncelik Sıralaması (Dematel - Gray Dematel Criteria Priority Ranking)

KRİTERLER	DEMATEL Kriterler Önceliği	GRİ DEMATEL Kriterler Önceliği
Bilinç Düzeyi ve Farkındalık	5	5
İdari ve Hukuki Düzenlemeler	3	2
Altyapı	4	4
Finansman ve Destek	2	3
Uygulama	1	1

4. TARTIŞMA VE SONUÇ (CONCLUSIONS AND RESULTS)

Bir düşüncüyü aktarabilmek için anlatılmak istenen kavramın ya da problemin nicel özelliklerinden yararlanmak her zaman daha etkileyici ve anlamlıdır yani bir konu ile ilgili istatistiksel bilgileri, anketleri, araştırmaları paylaşmak kısaca sayısal verilerden yararlanmak o konuyu daha anlaşılır hale getirir. Ayrıca çalışma hayatında yöneticilerimizi sayılarla ikna etmenin daha kolay olduğu herkes tarafından bilinegelen bir klişe ama doğru bir ifadedir.

Bu çalışmada geri dönüşüm konusunda belirlenen sorun alanlarının önem derecelerini sezgisellikten kurtarıp somutlaştırmaya çalışıldı. Problem çözümünde sayısal verilerden ve Dematel metodundan faydalandı. Dematel metodunun avantajı; kriterler arası ilişkileri ve ilişkilerin derecesini inceleyen, “sebe-sonuç, etkileyen-etkilenen hangi kriterdir?” sorusunu cevaplayan etkili bir yöntem olmasıdır.

Fakat bir araştırma yapılırken uzmanlardan alınan dilsel ifadeler net rakamlarla ifade edilmektense bir aralık içinde olabiliyor. Bu gibi durumlarda uzman değerlendirmeleri gri sayılarla yapıldığı takdirde sistem daha güvenilir hale gelmekte. Yani bulanık mantıkta kullanılan dilsel ifadeler yerine

uzman değerlendirmelerinin gri sayılarla yapılmasıyla uzmanlardan daha net bilgi alınmakta bu da yapılan değerlendirmelerde güvenilirliği artırmaktadır. Bu yüzden DEMATEL metodu ile çözülen problem bir de Gri DEMATEL ile çözüldü yani Gri DEMATEL'in esnek yapısı probleme uyarlandı. Böylelikle problemdeki belirsiz yapı test edilip sonuçların bu belirsizliği hangi derecede duyarlı olduğunu görüldü.

Bu çalışmada geri dönüşümün zayıf yönleri olarak belirlenen 5 kriter arasından **Uygulama** konusunun sıralamada 1. Sırada yer aldığını Dematel ve Gri Dematel metotları ile görüldü. Yani atık yönetimi konusunda uygulama eksiklikleri başı çekmektedir. Sonuncu yani 5. Sırada yer alan Bilinç düzeyi ve farkındalık kriteri iki yöntemde de aynı sırada belirlenmiştir. Gri Dematel ile Dematel yönteminin sonuçlarındaki farklılık ara sıralamalarda değişkenlik göstermiştir.

T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığının hazırlamış olduğu **Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planında** belirlenip Geri dönüşüm sektöründe uygulama eksiklikleri konusunda izlenmesi gereken politikalar şu şekildedir;

- ❖ Geri dönüşüm sektörüne katkı sağlayan firmalar kayıt altına alınmalıdır.
- ❖ Denetimlerin sayısı artırılmalıdır.
- ❖ Geri dönüştürülebilen atıkların düzenli depolama alanlarına alınmasını engelleyen mevzuatın daha etkin biçimde uygulamaya alınmalıdır.
- ❖ Yerel yönetimlerin daha etkili denetimleri ile özel sektörün konuya daha duyarlı olmasına yönelik çalışmalar yapılmalıdır.
- ❖ Belediyelerin yetki, sorumluluk ve yükümlülüklerini yerine getirme hususunda ilgili kuruluşlarca denetimlerinin ve yaptırımlarının artırılması sağlanmalıdır.
- ❖ Kurumlar arası koordinasyonu arttırıp ve işbirliği oluşturacak bir sistem hazırlanıp kurum ve kuruluşlar atık yönetimi konusunda örgütlenmelidir.
- ❖ Kayıt dışı toplayıcılığı önlemek için atık verileri ve istatistikleri konusunda kamu ile özel sektör işbirliği ile ortak veri tabanları oluşturulmalıdır.

- ❖ Etkili sonuçlar veren bir denetim ve uygulama için deneyimli uzmanların alımı yapılmalı ve personelin yetenek ve kapasiteleri artırılmalıdır.

İleriki çalışmalarda Strateji planında atık yönetiminde yaşanan diğer sorun alanları ve izlenmesi gereken diğer politikalar da önerilen yöntemlerle analiz edilerek öncelikli alanları ve izlenmesi gereken öncelikli politikalar da belirlenebilir.



Sonuç olarak insanlara, hayatlarında en önemli olan şeyleri sıraladıklarında hiç şüphesiz sağlık kelimesi ilk sıralarda yer alacaktır. Sağlıklı olabilmenin de yaşanan çevre ile ilişkisi birçok araştırma ile sabittir. Atıkların oluşturulması ile başlayan atık yönetimi konusuna gerekli hassasiyet gösterilmelidir. Bu çalışmada atık yönetimi ve geri dönüşüm konusundaki aksaklıklara ÇKKV teknikleri olan Dematel ve Gri Dematel yöntemleri ile dikkat çekmeye çalışıldı.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Büyüksaatçı, T. Küçükdeniz ve Ş. Esnaf, "Geri Dönüşüm Tesislerinin Yerinin Gustafson-Kessel Algoritması-Konveks Programlama Melez Modeli Tabanlı Simülasyon İle Belirlenmesi", *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 13: 1-20, 2008.
- [2] T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, "Ulusal Geri Dönüşüm Strateji Belgesi ve Eylem Planı", 2014-2017.
- [3] N. Tojo, ve C. Fischer, "Europe as a Recycling Society: European Recycling Policies in relation to the actual recycling achieved", *European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production*, ETC/SCP working paper 2/2011.
- [4] Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇSB), Çevre ve Şehircilik Bakanlığının basılmamış verileri, 2013.
- [5] M. Thurgood, Ed., "Decision-maker's guide to solid waste landfills: summary. transport, water and urban development department", *The World Bank*, Washington, D.C. Retrieved, 1999.
- [6] G. Laustsen, "Reduce-recycle-reuse: guidelines for promoting perioperative

- waste management”, *AORN Journal*, 85(4), 717–722, 2007.
- [7] S. Matsumoto, “Waste separation at home: are Japanese municipal curbside recycling policies efficient?”, *Conservation and Recycling*, 55, 325–334, 2011.
- [8] J.Owens, S. Dickerson ve D. L. Macintosh, “Demographic covariates of residential recycling efficiency”, *Environment and Behavior*, 32(5), 637–650, 2000.
- [9] C. M. Werner, ve E. Makela, “Motivations and behaviors that support recycling”, *Journal of Environmental Psychology*, 18(4), 373–386, 1998.
- [10] T.C. Kelly, I.G. Mason, M.W. Leiss ve S. Ganesh, “University community responses to on-campus resource recycling”, *Resources Conservation and Recycling*, 47, 42–55, 2006.
- [11] A. Malakahmad, M. Z. Z. Nasir, S.R.M. Kutty, ve M.H. Isa, “Solid waste characterization and recycling potential for university technology petronas academic buildings”, *American Journal of Environmental Sciences*, 6(5), 422–427, 2010.
- [12] M.D. Kaplowitz, F.K. Yeboah, L. Thorp ve A.M. Wilson, “Garnering input for recycling communication strategies at a big ten university”, *Conservation and Recycling*, 53,612–623, 2009.
- [13] R. Elfithri, T.K. Ghee, N.E.A. Basri ve S. N. Zain, “Integrated paper recycling management system in UKM campus”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 60, 556–561, 2012.
- [14] L. Pike, T. Shannon, K. Lawrimore, A. Mcgee, M. Taylor ve G. Lamoreaux, “Science education and sustainability initiatives: a campus recycling case study shows the importance of opportunity”, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 4, 218–229, 2003.
- [15] D.P. Smyth, A.L. Fredeen ve A. L. Booth, “Reducing solid waste in higher education: the first step towards greening’a university campus”, *Resources Conservation and Recycling*, 54, 1007–1016, 2010.
- [16] T. Türker, M. Etöz ve Y. Türker, “Üniversitelerde Bölüm Etkinliklerinin Ölçülmesinde Kullanılan Kritik Başarı Faktörlerinin Bulanık DEMATEL Yöntemi ile Belirlenmesi”, *Dergipark*,4,1, 2016.
- [17] M. Karaatli, N. Ömürbek, E. Isik ve E. Yılmaz, “Performans Değerlemede DEMATEL ve Bulanık TOPSIS Uygulaması”, *Ege Akademik Bakis*, Izmir 16,1:49-64, 2016.
- [18] M.S.F. Javan ve S. F. Javan, “Analysis Of The Banking Challenges In The Business Environment Using Dematel Technique”, *ICASE Conference*,2015.
- [19] M. Ilker, H. Göksen ve M.A. Tuncer, “Kablo Sektöründe Tedarikçi Seçimi İçin Bütünleşik DEMATEL-AAS-VIKOR Yönteminin Kullanılması”, *Ege Akademik Bakis*; Izmir 15.2: 285-300, 2015.
- [20] O. Özveri, P. Güçlü ve E. Ayçin, “Evaluation Of Service Supply Chain Performance Criteria With Danp Method”, *ASSAM Uluslararası Hakemli Dergi*, 2, 4,2015.
- [21] M. Etöz ve M. Düğenci, “Determination Of Effective Critical Success Factors In Successful Implementation Of ERP By Using Fuzzy Dematel Method”, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 20,1, 115-126, 2015.
- [22] Ş. Altan ve E. A. Karaş “Bulanık Dematel ve Bulanık Topsis Yöntemleri İle Üçüncü Parti Lojistik Firma Seçimi İçin Bütünleşik Bir Model Yaklaşımı”, *Suleyman Demirel University Journal of Faculty of Economics & Administrative Sciences*, 20 Issue 3, 99-119,2015.
- [23] Ö. Bali, S. Tütün, A. Pala, ve C. Çörekçi, “3PL Sağlayıcı Seçimi İçin Bulanık Dematel Ve Bulanık Topsis İle Mcdm Yaklaşımı”, *Sigma* 32, 222-239, 2014.
- [24] Ö. Eroğlu, “Assessment of Maintenance/Repair Alternatives with The Fuzzy DEMATEL and SMAA-2 Methods”, *Yüksek Lisans Tezi*, Ankara, 2014.
- [25] E. Aydemir, F. Bedir ve G. Özdemir, “Gri Sistem Teorisi Ve Uygulamaları: Bilimsel Yazın Taraması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, C.18, S.3, S.187-200, 2013.

- [26] M. L. Tseng, “A causal and effect decision making model of service quality expectation using grey-fuzzy DEMATEL approach.”, *Expert Systems with Applications*, 36, 7738–7748, 2009.
- [27] C. Bai ve J. Sarkis, “A grey-based DEMATEL model for evaluating business process management critical success factors”, *International Journal of Production Economics*, 146 (1), 281-292, 2013.
- [28] Y. Dou, ve J. Sarkis, “A multiple stakeholder perspective on barriers to implementing China RoHS regulations”, *Resour. Conserv. Recycl.* 81, 92-104, 2013.
- [29] H. Liang, J. Ren, Z. Gao, S. Gao, X. Luo, L. Dong ve A. Scipioni, “Identification of critical success factors for sustainable development of biofuel industry in China based on grey DEMATEL”, *Journal of Cleaner Production* 131,500-508, 2016.
- [30] G. Büyüközkan, S. Güleriyüz, “An integrated Dematel-ANP Approach for renewable energy resources selection in Turkey”, *International Journal of Production Economics*, 182, 435-448, 2016.
- [31] S. Şahin ve Z. Hatunoğlu, “Geri Dönüşüm Sistemlerine Yönelik Algı Düzeyi, Finansmanı ve Muhasebesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Örneği”, *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, Cilt 12, Yıl 12, Sayı 2, 2016.
- [32] C.C. Yang ve Chen, B.S., “Key quality performance evaluation using fuzzy AHP”, *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, 21-6, 543-550, 2004.
- [33] Ö. Eroğlu, “Bakım/onarım alternatiflerinin bulanık DEMATEL ve SMA-2 Yöntemleri ile değerlendirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2014.
- [34] C. Zopounidis, “MCDA methodologies for classification and sorting”, *European Journal of Operational Research*, 138, 227–228, 2002.
- [35] E. Fontela ve A. Gabus, “DEMATEL, innovative methods. Report no. 2 structural analysis of the world problematique”, *Battelle Geneva Research Institute*, 67-69, 1974.
- [36] C.W. Li ve G. H. Tzeng, “Identification of a threshold value for the DEMATEL method using the maximum mean de-entropy algorithm to find critical services provided by a semiconductor intellectual property mall” *Expert Systems with Applications*, 36: 9891–9898, 2009.
- [37] S. Dey, A. Kumar, A. Ray ve B. B. Pradhan, “Supplier Selection: Integrated Theory using DEMATEL and Quality Function Deployment Methodology”, *Procedia Engineering*, 38, 3560-3565, 2012.
- [38] Y. Çınar, “Kariyer Tercihi Probleminin Yapısal Bir Modeli ve Riske Karşı Tutumlar: Olasılıklı DEMATEL Yöntemi Temelli Bütünleşik Bir Yaklaşım”, *Sosyoekonomi*,1,158-186,2013.
- [39] W.H. Tsai ve W.C. Chou “Selecting management systems for sustainable development in SMEs: A novel hybrid model based on DEMATEL, ANP, and ZOGP”, *Expert Systems with Applications*, 36: 1444–1458, 2009.
- [40] Y. J. Chiu, H. C. Chen, G. H. Tzeng, ve J. Z. Shyu, “Marketing strategy based on customer behaviour for the LCD-TV”, *International Journal and Decision Making*, 7(2/3): 143–165, 2006.
- [41] Liu, ve Y., Lin, “Grey Information”, *Theory and Practical Applications*, Springer, 11-21, 2006.
- [42] K.L. Wen, “Grey Systems: Modeling and Prediction, Tucson”, USA, *YangSky Scientific Press*, 2004.
- [43] E. Kose, I. Temiz S. Erol, “Grey System Approach for Economic Order Quantity Models Under Uncertainty”, *The Journal of Grey System*, 1:71-82, 2011.
- [44] E. Kose, H.S. Aplak, ve M.Kabak, “Personel Seçimi için Gri Sistem Teori Tabanlı Bütünleşik Bir Yaklaşım” *Ege Academic Review*,13(461-471), 2013.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 27-09-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 22-11-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.340123	

Elektrokoagülasyon Prosesi ile Patates Cipsi üretim atıksularından fosfor giderimi: Elektrot Materyali karşılaştırması

Murat Solak^{*1}, Nazlı Baldan Pakdil, Mehmet Kılıç, Mehmet Kobya

ÖZ

Çalışmada, Al ve Fe elektrotlarının kullanıldığı sürekli akışlı elektrokoagülasyon (EK) prosesi ile patates cipsi üretimi atıksularından fosfor giderim verimi araştırılmıştır. pH, akım yoğunluğu ve elektroliz süresi gibi fosfor giderim verimini etkileyen işletme parametreleri optimize edilmiştir. Al ve Fe elektrotlarının kullanıldığı sürekli akışlı EK model reaktörü için optimum hidrolik bekleme süresi sırasıyla, 40 dk ve 60 dk, akım yoğunluğu ise her iki elektrot türü için 65 A/m², çıkış pH değerleri sırasıyla 7,85 ve 8,15 olarak tespit edilmiştir. Bu deneysel koşullarda, 54,4 mg/L olan ham atıksu toplam fosfor konsantrasyonu, Al ve Fe elektrodunun kullanımı ile sırasıyla 10,4 ve 5,0 mg/L'ye, 45,3 mg/L olan ham atıksu ortofosfat konsantrasyonu, Al ve Fe elektrodunun kullanımı ile sırasıyla, 5,9 ve 2,9 mg/L'ye düşmüştür. Çıkış pH değerlerine bakıldığında elde edilen çıkış suyu pH ayarlamasına gerek kalmaksızın deşarj edilebilir niteliktedir.

Sürekli akışlı EK model reaktöründe, elektrot, enerji ve kimyasal maliyetleri dikkate alınarak hesaplanan işletme maliyeti Al ve Fe elektrot türleri için sırasıyla, 1,14, 0,76 \$/m³ olarak tespit edilmiştir. Fe elektrodunun, Al elektroduna göre patates cipsi üretim atıksularından fosfor gideriminde daha etkili olduğu, ayrıca, işletme maliyeti analizi sonucunda da Fe elektrot türünün kullanılması ile işletme maliyetinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, EK prosesinin ortofosfat ve toplam fosfor giderimlerinin 2. derece reaksiyon kinetiğine uyduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: alüminyum elektrot, demir elektrot, elektrokoagülasyon, fosfor giderimi, işletme maliyeti, patates cipsi işleme atıksuyu

¹ Murat SOLAK, Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Düzce, muratsolak@duzce.edu.tr

² Nazlı BALDAN PAKDİL, Abant İzzet Baysal Üniversitesi Mühendislik Mim. Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Bolu, nazlipakdil@gmail.com

³ Mehmet KILIÇ, Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Isparta, mehmetkilic@sdu.edu.tr

⁴ Mehmet KOBYA, Gebze Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Gebze, kobyaa@gtu.edu.tr

Removal of phosphorus from Potato Chips processing wastewater by Electrocoagulation Process: comparison of Electrode Material

ABSTRACT

In this study, removal of phosphorus from potato chips processing wastewater by electrocoagulation (EC) process was investigated by using Al and Fe electrodes. Operating parameters affecting phosphorus removal efficiency such as pH, current density and electrolysis time were optimized. In the EC model reactor in which either Al or Fe electrodes were used, the optimum hydraulic retention time was found to be 40 and 60 min, respectively, while the final pH was found to be 7.85 and 8.15, respectively, and the current density was found to be 65 A/m² for both electrode types. In case of using Al and Fe electrodes under these experimental conditions, the initial total phosphorus concentration of 54.4 mg/L decreased to 10.4 and 5.0 mg/L, respectively, and the initial orthophosphate concentration of 45.3 mg/L decreased to 5.9 and 2.9 mg/L, respectively. Considering the final pH value, it can be pointed out that the resultant effluent can be discharged without any pH adjustment.

Considering the costs for electrodes, energy and chemical agents, operating costs for the continuous-flow EC model reactor were found out to be \$1.14 and 0.76 per cubic meter wastewater for Al and Fe electrodes, respectively. It was determined that Fe electrodes are more effective than Al electrodes for the removal of phosphates from potato chips processing wastewaters, and that the operating costs are lower when Fe electrodes are used. It has been determined that the orthophosphate and total phosphorus removal by the EC process is suitable with the second order reaction kinetics.

Keywords: aluminum electrode, iron electrode, electrocoagulation, phosphorus removal, operating cost, potatoes chips processing wastewater

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nüfus artışı, kentleşme ve teknolojideki hızlı gelişmelere bağlı olarak endüstriyel ve tarımsal faaliyetler artarken, artan bu faaliyetler sonucunda da atıksu oluşumu artmaktadır. Bu atıksuların, deniz, göl, ırmak gibi en yakın alıcı ortamlara deşarj edilmesi, deşarj edilen alıcı ortamlarda karbon, azot ve fosfor gibi besin maddelerinin artmasına neden olmakta, alıcı ortamlarda yaşayan organizmalar ve diğ er canlı türlerini olumsuz yönde etkilemektedir [1]. Bu besi elementlerinden biri olan fosfor, canlıların önemli yapı taşlarından biri olması nedeniyle çevrede ve biyolojik arıtma proseslerinde büyük önem taşımaktadır [2]. Ayrıca fosforun suda yüksek miktarlarda bulunması, aşırı derecede alg büyümesi, bunu takip eden bitki büyümesi, çözülmüş oksijen tükenmesi ve istenmeyen koşul olan ötrofikasyon olayına neden olmaktadır [3].

Alıcı ortamlarda mevcut fosforun kaynakları, evsel ve endüstriyel atıksuların yanında tarımsal faaliyetlerdir. Ancak, alıcı ortama ulaşan fosfor kaynağının sadece % 9'unu tarımsal üretim alanları oluştururken, % 91'ini evsel atıksular

oluşturmaktadır. Endüstriyel atıksu, noktasal olmayan bölgelerden akış, deterjanlar ve diğ er faktörler atıksuda beklenenden daha fazla fosfor konsantrasyonuna neden olmaktadır. Ötrofikasyon kontrolünde sınırlayıcı besi maddesi olan fosforun atıksudaki miktarında deterjanların fosfatlı katkı maddelerinin payı büyüktür [4].

Farklı atıksularda bulunan tipik fosfat konsantrasyonları ise, evsel atıksularda 3-15 mg P/L, tarım drenaj suyu 0,05-1 mg P/L ve göl yüzey suyu 0,01-0,04 mg P/L şeklindedir. Yeni deşarj edilmiş bir evsel atıksuda, yaklaşık olarak 5 mg P/L ortofosfat, 3 mg P/L tripolifosfat, 1 mg P/L pirofosfat ve < 1 mg P/L organik fosfat bulunur [5].

Sulardan fosfor gideriminde, adsorpsiyon [6], iyon değıştirme [7], membran [8], biyolojik arıtma [9], kimyasal koagülasyon [10], elektrokoagülasyon [11] gibi çeşitli prosesler kullanılmaktadır.

Kimyasal koagülasyon prosesi de sulardan fosfor gideriminde sıkça kullanılan proseslerden biridir.

Kimyasal koagülasyon prosesi ile fosfor giderimde çok değerlikli metal iyonları (Ca^{2+} , Fe^{3+} ve Al^{3+}) kullanılmaktadır [12]. Bu proste, kimyasal madde tüketimi, koagülant dozajı ve çıkış suyu pH değerinin sürekli kontrolü gerekmektedir. Kimyasal koagülasyon prosesi ile Al ve Fe iyonlarının haricinde suya sülfat, klorür gibi eklenen koagülantın yapısında bulunan kimyasal maddelere göre farklı iyonlar da ilave edilmekte, prosesin optimize edilmemesi durumunda ilave kirlilik oluşabilmektedir.

Elektrokimyasal proseslerden olan elektrokoagülasyon (EK), su/atıksu akımlarındaki birçok kirleticinin giderilmesinde kullanıldığı gibi fosfor gideriminde kullanımı da son zamanlarda artmıştır. EK prosesi, elektroliz sonucu anodun çözünmesiyle su ortamına verilen metal hidroksit floklarının oluşturulması ile kirleticilerin giderildiği bir prostedir [13; 1]. EK, çok küçük kolloidal tanecikleri uzaklaştırabilme, nispeten daha az çamur üretme, biyolojik olarak bozunmayan organik maddeleri uzaklaştırabilme veya biyolojik arıtıma hazır hale getirme, koagülant dozajının kolayca kontrol edilebilmesi, hidroksitler şeklindeki çökelekler veya floklar üzerinde adsorpsiyonla ağır metal iyonlarını uzaklaştırabilme, sürekli pH kontrolü gerektirmeme gibi avantajlara sahiptir. Ancak bu proses, katotta üretilen H_2 gazının çökelmeyi engellemesi, arıtılan sudaki Al ve Fe iyonlarının konsantrasyonlarının nispeten yüksek olması, üretilmiş çözünmeyen hidroksitlerin elektrotlar arasında birikmesi gibi birtakım dezavantajlara da sahiptir [15; 14; 1].

Çalışmada patates cipsi üreten bir işletmeden temin edilen atıksu numunesi ile farklı elektrot türlerinin kullanıldığı sürekli akışlı EK reaktörü ile fosfor giderimi üzerine pH, elektroliz süresi ve akım yoğunluğu gibi işletme parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, elektrokoagülasyon prosesindeki elektrik, elektrot tüketimleri ile bu tüketimler sonucunda Al ve Fe elektrotlarının kullanıldığı EK prosesinin fosfor giderimi sırasındaki işletme maliyetlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Atıksu Karakterizasyonu (Characterization of Wastewater)

Sürekli akışlı EK prosesi çalışmalarında, patates cipsi üreten bir işletmenin atıksu arıtma tesisi nişasta çöktürme ünitesi sonrası alınan atıksu, 1 gün çöktürme sonrasında kaba filtre kağıdından süzölmüş, süzöntü deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Sürekli akışlı EK model reaktörü ile ham atıksuyun arıtılması adına çalışmalar yürütölmüştür. Ham atıksuyun karakterizasyonu Tablo 1’de görölmektedir.

Tablo 1. Ham atıksu karakterizasyonu (Characterization of Raw Wastewater)

Parametre	Konsantrasyon
pH	5,00 ± 0,2
İletkenlik	3,07 ± 0,7 mS/cm
Toplam Fosfor	54,4 ± 0,5 mg/L
Ortofosfat	45,3 ± 0,5 mg/L
KOİ	4425 ± 50 mg/L

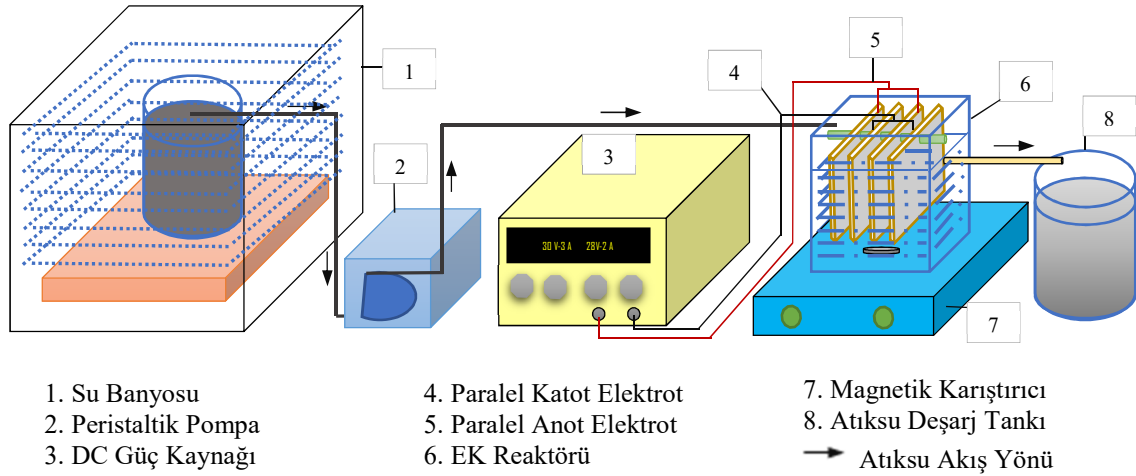
2.2. Sürekli Akışlı EK Model Reaktörü (Continuous Flow EC Model Reactor)

Deneysel çalışmalarda, akım ve voltaj kontrolü GPS-3303-Multi Output DC Power Supply (0-30V, 0-3A) model güç kaynağı ile sağlanmıştır. Karıştırma işlemi IKA RCT basic model karıştırıcı ile gerçekleştirilmiştir. DC güç kaynağı, karıştırıcı ve peristaltik pompanın harcadığı enerji, Tchibo TCM 248735 marka watt ölçer ile tespit edilmiştir. EK deneylerinde kullanılan reaktör 1200 ml hacme sahiptir. Elektrot bağlantı sisteminde elektrotlar arası mesafe 5 mm olarak tasarlanmıştır. Elektrot materyalinin boyutları, Al elektrot sistemi için 40*80*0,5 mm, Fe elektrot sistemi için 40*80*0,3 mm’dir. Ancak, su içerisinde kalan ve elektroliz işleminin gerçekleştiği elektrot boyutları 40*60 mm’dir. Deneylerde, her iki elektrot türü için de 144 cm² aktif yüzey alanına sahip Al ve Fe elektrotlar kullanılmıştır. Reaktörde her bir deney için 1000 mL atıksu numunesi kullanılmıştır. Atıksu sıcaklığının prosese etkisinin azaltılması için giriş suyu sıcaklığı su banyosu kullanılarak sabit tutulmuştur.

Anot ve katot elektrotların paralel olarak bağlanmasından dolayı akım her bir hücrenin

direncine göre bölünür. Böylece, seri bağlantıya oranla daha düşük potansiyel fark gereklidir. Bu yüzden EK çalışmalarında paralel bağlı sistem seçilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan

paralel bağlı EK prosesinin şematik gösterimi Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Sürekli Akışlı EK Prosesi (Continuous Flow EC Process)

2.3. Deneyler (Experiments)

Deneysel çalışmalar oda sıcaklığında (~25°C) gerçekleştirilmiştir. Sürekli akışlı olarak tasarlanan reaktöre atıksu, besleme tankından (Ecoline-ISMATEC model) peristaltik pompa ile basılmıştır. Değişken parametre olarak elektroliz süresi ve akım yoğunluğunun fosfor giderimine etkisi incelenmiştir. Elektrotlar, tasarlanan elektrot bağlantı sistemine yerleştirildikten sonra elektroliz işlemine başlanmıştır. Model reaktör içerisinde çökeltme olmaması ve anyon-katyonların temasının daha iyi olması için 250 rpm karıştırma hızında sürekli olarak karıştırılmıştır. Model reaktörden alınan çıkış suyu, parametre analizinden önce 0,45 µm gözenek çapına sahip sırınga filtreden süzölmüştür.

2.4. Fosforun Belirlenmesi (Determination of Phosphorus)

Ortofosfat tayini, Vanadomolibdofosforikasit kolorimetrik metoduna (SM-4500 P C) göre yapılmıştır [16].

2.5. Hesaplamalarda Kullanılan Eşitlikler (Equations Used in Calculations)

Çalışmada, işletme maliyeti her bir elektrot ve bağlantı türü için \$/m³, \$/kg fosfor olarak eşitlik (1) yardımıyla belirlenmiştir.

$$\text{İşletme Maliyeti}_{EC} = [(a \times C_{\text{enerji}}) + (b \times C_{\text{elektrot}})] \quad (1)$$

2017 verilerine göre enerji ve elektrot materyallerinin birim fiyatları; enerji maliyeti: a(0,06 \$/kWsa) [17] ve b(Fe elektrot materyali; 0,58 \$/kg [18], Al elektrot materyali; 5,23 \$/kg) [19], C_{enerji}; 1 kg fosfor gidermek veya 1 m³ atıksuyu arıtmak için harcanan elektrik enerjisi, C_{elektrot}; 1 kg fosfor gidermek veya 1 m³ atıksuyu arıtmak için harcanan elektrot miktarını göstermektedir.

Akım yoğunlukları eşitlik (2) ile hesaplanmıştır. Eşitlikte, J: Akım yoğunluğu (A/m²), I: Akım şiddeti (Amper(A)), Aktif anot yüzey alanını (m²) ifade etmektedir.

$$J=I/A \quad (2)$$

Toplam çözünen Al veya Fe miktarı (M_T), eşitlik (3) ile hesaplanmıştır. Burada, M_A: pratikte katot elektrottaki çözünme miktarı (g), M_K: pratikte katot elektrottaki çözünme miktarıdır (g).

$$M_T=M_A+M_K \quad (3)$$

Enerji Tüketimi(Wh) ise eşitlik (4) ile hesaplanmıştır. Burada; E: Elektrik enerjisi (Wh), V: volt, I: akım şiddeti (A), t: zaman (saat)'dır.

$$E=V \times I \times t \quad (4)$$

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Elektroliz süresi etkisi (Effect of Electrolysis Time)

Sürekli akışlı EK model reaktörüne atıksu, 0,07 L/dk'lık sabit debide, 15 dk'lık hidrolik bekleme süresinde, Al elektrot için başlangıç pH değeri optimize edilmiş olan 6,80'e; Fe elektrot için 6,32'ye ayarlanarak verilmiştir.

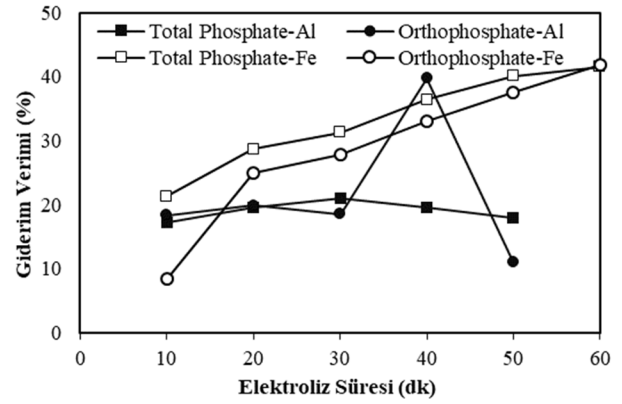
Sürekli akışlı EK model reaktöre, 35 A/m²'lik akım yoğunluğu uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler Tablo 2'de görülmektedir.

Elektroliz işlemi sonrasında pH değeri 6,88-7,13 arasında değişim göstermiştir. pH değerlerine bakıldığında hidroliz sonucunda oluşan hidroksitlerden dolayı çıkış pH değerleri, giriş değerlerinin üzerindedir. Çıkış suyu iletkenlik değerleri de çözünen elektrot materyali ve artan iyon konsantrasyonuna bağlı olarak artmıştır. Al elektrodunda optimum elektroliz süresi 40 dk iken Fe elektrodunun kullanıldığı EK model reaktöründe bu süre 60 dk olarak belirlenmiştir.

EK prosesinde elektroliz süresi, anodun elektrokimyasal olarak çözünerek reaksiyon süresince metal hidroksitlerin oluşması adına oldukça önemli bir parametredir. Atıksudaki kirleticilerin konsantrasyonu, türü ve uygulanan akım yoğunluğu gibi koşullara bağlı olarak EK süresi arttıkça giderme veriminin arttığı görülür. Belirli bir süre sonunda EK süresinin artışı giderim verimini etkilememekle birlikte, genellikle düşük elektroliz sürelerinde giderme verimleri düşük olmaktadır [20].

Al elektrodu için en yüksek toplam fosfor giderim verimi 30 dk'lık elektroliz süresinde % 21 olarak, Fe elektrodunda 60 dk'lık elektroliz süresinde % 41,5 olarak tespit edilmiştir (Şekil 2). Al elektrodunun kullanılması ile en yüksek fosfor giderimi % 21 ile 30 dk'lık elektroliz süresinde sağlanırken, aynı verim Fe elektrodunda onuncu dakika sağlanmıştır. Bu anlamda, toplam fosfor giderim verimi açısından Fe elektrodu Al elektroduna göre daha etkindir (Tablo 2).

Her iki elektrot türü için de aynı debi ve 35 A/m² akım yoğunluğunda giderim belli bir süreden sonra sabitlenmiş ve yakaladığı verimin çok fazla üzerine çıkamamıştır. Uygulanan 35 A/m²'lik akım yoğunluğunun yeterli olmadığı daha yüksek akım yoğunluklarının çalışılması gerektiği belirlenmiştir.



Şekil 2. Toplam Fosfat ve Ortofosfat Giderim Verimleri (Removal Efficiencies of Total Phosphorus and Orthophosphate)

Tablo 2. Deneysel Çalışma Sonuçları (Experimental Study Results)

t (dk)	pH		İletkenlik (mS/cm)		Ortofosfat (mg/L)		E _{ortofosfat} (%)	ΣP		E _{T.Fosfor} (%)	C _{Al} (mg/L)	
	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış	Giriş	Çıkış		Giriş	Çıkış			
Al Elektrot												
10	6,83	6,88	2669	3030	45,3	37	54,4	18,32	45,0	17,3	7	
20		7,07		2960		36,3		19,87	43,8		19,5	16
30		6,95		2960		36,9		18,54	43,0		21,0	21
40		7,13		2910		27,3		39,74	43,8		19,5	24
50		7,00		2900		40,3		11,04	44,6		18,0	29
Fe Elektrot												
10	6,32	6,64	1977	2762	45,3	41,5	54,4	8,39	42,8	21,3	49,8	
20		6,81		2558		34,0		24,9	38,8		28,7	48,4
30		6,93		2475		32,7		27,8	37,4		31,3	37,4
40		7,01		3020		30,3		33,1	34,6		36,4	34,6
50		6,99		2970		28,3		37,5	32,6		40,1	32,6
60		6,99		2978		26,3		41,9	31,8		41,5	31,8

3.2. Akım yoğunluğunun etkisi (Effect of Current Density)

Elektroliz süresinin fosfor giderimine etkisinin belirlendiği çalışmada 35 A/m² akım yoğunluğunun yetersiz gelmesi giderim verimini artırmak için akım yoğunluğunun artırılması ya da debinin düşürülmesini gerektirmektedir. Debinin düşürülmesi arıtılan su miktarını düşüreceğinden ve akım yoğunluğunun etkili bir parametre olduğu bilgisine dayanarak, akım yoğunluğunun etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. EK model reaktörüne, 50 ve 65 A/m²'lik akım yoğunlukları uygulanmıştır. Bu deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlar Tablo 3'te verilmiştir.

Al elektrodunun kullanıldığı EK model reaktöründe 35 ve 50 A/m² akım yoğunlukları için 40 dk elektroliz süresinde toplam fosfor giderim verimleri sırasıyla, % 21 ve % 76,8 olarak, 65 A/m² akım yoğunluğu ve 30 dk'lık elektroliz süresinde ise % 80,9 olarak tespit edilmiştir. Al elektrodu ile en yüksek toplam fosfor giderimi 30 dakikalık elektroliz süresinde 65 A/m² akım

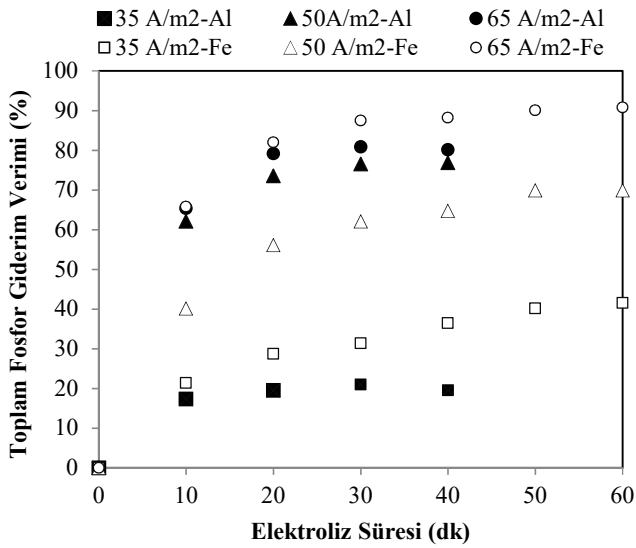
yoğunluğunda % 80,9 olarak belirlenmiştir. Fe elektrodunda en yüksek toplam fosfor giderim verimi ise 65 A/m² akım yoğunluğunda, 60 dakikalık elektroliz süresinde % 90,8'dir. Al elektrodunun kullanıldığı ve en yüksek toplam fosfor giderim veriminin sağlandığı 30 dakikalık elektroliz süresinde, Al elektrodu % 80,9 giderim verimi sağlarken, Fe elektrodunda aynı süre için % 87,5 giderim sağlanmıştır.

Al ve Fe elektrotlarının kullanıldığı EK model reaktörüne uygulanan akım yoğunluğunun artmasıyla ortofosfat giderim verimlerinde de artış gözlenmiştir (Şekil 3,4). Akım yoğunluğu parametresinin elektrot çözünmesini doğrudan etkilediği ve sürekli akışlı EK model reaktörü için önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Akım yoğunluğunun artması, giderim verimini artırmaktadır [21;22]. Literatürde daha önce yapılan çalışmalarda da benzer olarak, akım yoğunluğunun fosfor gideriminde etkin parametre olduğu belirtilmektedir [23; 19; 20].

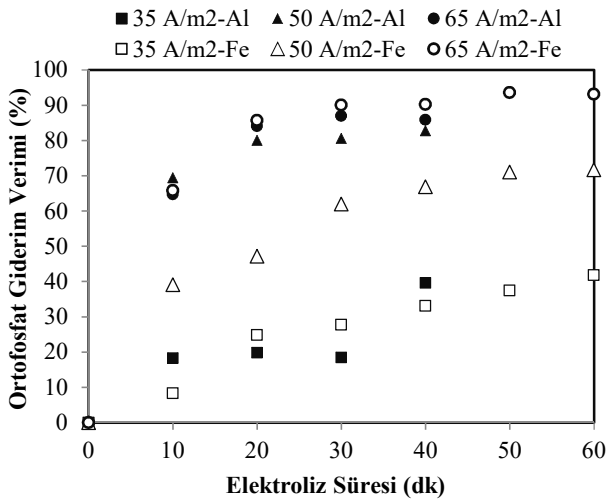
Tablo 3. Deneysel çalışma sonuçları (Experimental Study Results)

	Zaman (dk)	pH Giriş	pH Çıkış	İletkenlik Giriş	İletkenlik Çıkış	Orto-P Giriş	Orto-P Çıkış	Giderim Verimi (%)	ΣP Giriş	ΣP Çıkış	E _T .Fosfor (%)	C _{Al} (mg/L)	Farada y /m ³
Al Elektrot													
35 A/m ²	10	6,83	6,88	2669	3030	45,3	37	18,3	54,4	45	17,3	7	3,09
	20		7,07		2960		36,3	19,9		43,8	19,5	16	6,218
	30		6,95		2960		36,9	18,5		43	21,0	21	9,328
	40		7,13		2910		27,3	39,7		43,8	19,5	24	12,44
50 A/m ²	10	6,81	7,49	2855	3000	45,3	13,8	69,5	54,4	20,6	62,1	3	4,477
	20		7,50		2945		9,0	80,1		14,4	73,5	7,5	8,955
	30		7,48		2918		8,8	80,6		12,8	76,5	7	13,43
	40		7,33		2895		7,8	82,8		12,6	76,8	10	17,91
65 A/m ²	10	6,82	7,34	2125	2577	45,3	16,0	64,7	54,4	18,8	65,4	6,5	5,845
	20		7,52		2602		7,2	84,1		11,3	79,2	7,5	11,69
	30		7,51		2894		5,9	87,0		10,4	80,9	8,5	17,54
	40		7,53		2878		6,4	85,9		10,8	80,1	10,5	23,38
Fe Elektrot													
35 A/m ²	10	6,32	6,64	1977	2762	45,2	41,5	8,39	54,4	42,8	21,3	49,8	3,1092
	20		6,81		2558		34,0	24,9		38,8	28,7	48,4	6,2185
	30		6,93		2475		32,7	27,8		37,4	31,3	37,4	9,3277
	40		7,01		3020		30,3	33,1		34,6	36,4	34,6	12,437
	50		6,99		2970		28,3	37,5		32,6	40,1	32,6	15,546
	60		6,99		2978		26,3	41,9		31,8	41,5	31,8	18,655

50 A/m ²	10	6,33	6,83	2146	2908	45,3	27,6	39,1	54,4	32,6	40,1	43,6	4,4773
	20		7,05		2853		23,9	47,2		23,9	56,1	51,6	8,9546
	30		7,16		2827		17,2	62,0		20,6	62,1	56	13,432
	40		7,23		2796		15,0	66,9		19,2	64,7	53,8	17,909
	50		7,25		2741		13,1	71,1		16,4	69,9	52,2	22,386
	60		7,33		2717		12,8	71,7		16,4	69,9	54,4	26,864
65 A/m ²	10	6,32	7,17	2351	2884	45,3	15,5	65,8	54,4	18,6	65,8	39,0	5,8453
	20		7,57		2825		6,5	85,7		9,8	82,0	37,0	11,691
	30		7,66		2848		4,5	90,1		6,8	87,5	40,2	17,536
	40		7,73		2800		4,4	90,3		6,4	88,2	42,8	23,381
	50		7,85		2813		2,9	93,6		5,4	90,1	33,8	29,227
	60		8,15		2807		3,1	93,2		5,0	90,8	32,4	35,072

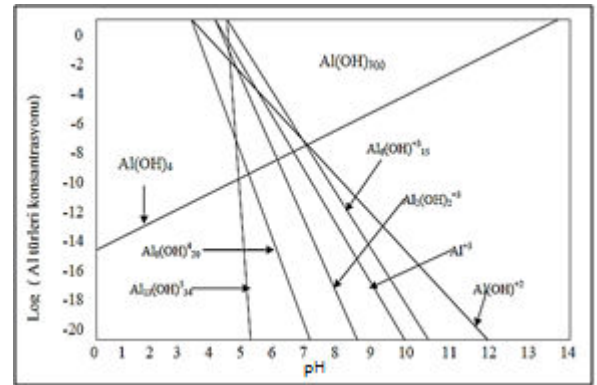


Şekil 3. Elektroliz süresinin toplam fosfor giderim verimine etkisi (Effect of Electrolysis Time on Total Phosphorus Removal Efficiency)



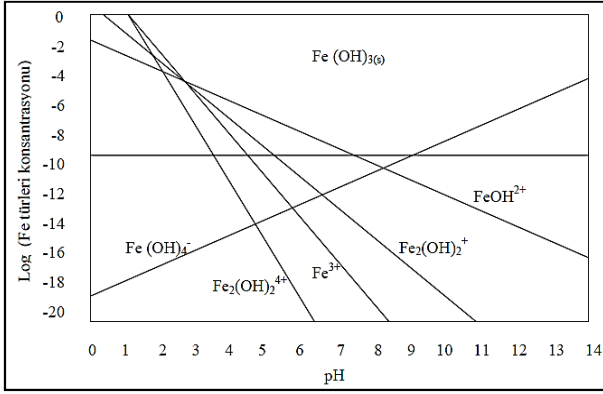
Şekil 4. Elektroliz süresinin ortofosfat giderim verimine etkisi (Effect of Electrolysis Time on Orthophosphate Removal Efficiency)

Çözelti pH değerine bağlı olarak, reaksiyon sonucu Al^{+3} iyonlarının hidrolizi ile $Al(OH)_{3(k)}$, $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)^{-4}$, $Al_6(OH)^{+3}_{15}$, $Al_8(OH)^{+4}_{20}$ gibi monomerik ve polimerik bileşikler oluşabilmektedir (Şekil 3) [23; 24]. Al elektrodunun kullanıldığı EK prosesinde giderim mekanizmasının presipitasyon ($pH < 4$) veya adsorpsiyon ($pH > 4$) olabileceği belirtilmiştir [26; 27]. Bu çalışmada, çıkış pH değerleri tüm akım yoğunlukları ve elektroliz süreleri için giriş pH değerine göre artmış ve elektroliz işlemi sırasında pH değeri 6,88-7,53 arasında değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu pH aralığında, hidroksit türlerinin çözünürlüğü en düşük seviyededir. Bu bakımdan sistemde, $Al(OH)_3$ bileşiğinin baskın olduğu ve giderim mekanizmasının adsorpsiyon olabileceği düşünülmektedir. Bu verilerin ışığında ortamda yeterli koagülantın bulunması ve pH'nın Al'in en düşük çözünürlüğe sahip olduğu aralıkta olmasının artırım veriminin artmasında en önemli etken olduğu düşünülmektedir [25; 26]. pH 6,0-8,0 aralığının dışındaki pH değerlerinde bileşik oluşumu $Al(OH)_{3(k)}$ formundan uzaklaşmakta ve ortamda çözünebilir Al bileşikleri formunda bulunmaktadır (Şekil 3) [27].



Şekil 5. Farklı pH'lerde Al kompleksleri (Al complexes at different pH) [12]

Fe elektrodunun elektrokimyasal oksidasyonu ile su ortamının pH değerine bağı olarak $Fe(OH)^{2+}$, $Fe(OH)^+_2$ ve $Fe(OH)_3$ bileşikleri oluşabilmektedir [30; 31; 32]. Çalışmada, elektroliz işlemi sırasında pH değeri 6,32-8,15 arasında değışim göstermiştir. Bu pH değerlerinde hidroksit türlerinin çözünürlüğü en düşük seviyededir. Bu bakımdan sistemde, $Fe(OH)_3$ bileşiğinin baskın olduğı düşünölmektedir (Şekil 6).



Şekil 6. Farklı pH'larda Fe kompleksleri (Fe complexes at different pH) [12]

3.3. Enerji ve Elektrot Tüketimi analizi (Analysis of Energy and Electrode Consumption)

Al ve Fe elektrodunun kullanıldığı sürekli akışlı EK model reaktörü ile yapılan çalışmalar

sonucunda, elektrot, enerji tüketimi ve bu parametrelere bağı olarak işletme maliyetleri hesaplanmıştır. İşletme maliyetinin belirlenmesinden önce toplam enerji tüketimi (DC güç kaynağı, karıştırıcı ve pompanın harcadığı enerji tüketimi) ve elektrot tüketimleri belirlenmiştir (Tablo 4).

Al ve Fe elektrotları için akım yoğunluğunun artması, enerji tüketimini ve çözünen elektrot materyali miktarını artırmıştır. En yüksek toplam fosfor giderim veriminin sağlandığı $65 A/m^2$ akım yoğunluğunda, toplam enerji tüketimi $10,48 kWsa/m^3$ olarak tespit edilmiş olup, toplam enerji tüketiminin yaklaşık % 68'ini DC güç kaynağı oluşturmuştur. Fe elektrodu kullanımı ile sürekli akışlı EK prosesi ile fosfor ve çinko giderimi üzerine yapılan farklı bir çalışmada 50, 100, 200, 400 ml/dk debiler için enerji tüketimini sırasıyla, 12,60; 11,30; 9,74; 5,45 $kWsa/m^3$ olarak tespit edilmiştir [20].

Elektrot tüketimi Al elektrot türü için $0,099 kgAl/m^3$, Fe elektrot türü için $0,237 kgFe/m^3$ 'tür.

Tablo 4. Farklı akım yoğunluklarında enerji ve elektrot tüketim miktarları (Energy and electrode consumption quantities in different current densities)

Akım Yoğunluğu (A/m ²)	Enerji Tüketimi (kWsa/m ³)			Toplam Enerji Tüketimi (kWsa/m ³)	Toplam Enerji Tüketimi (kWsa/gr giderilen fosfor)	Elektrot Tüketimi (kg/m ³)	Elektrot Tüketimi (kg/gr giderilen fosfor)
	DC Güç Kaynağı	Karıştırıcı	Pompa				
Al Elektrodu							
35	5,238	1,429	1,905	8,571	0,7518	0,097	0,0085
50	6,19	1,429	1,905	9,524	0,2278	0,099	0,0024
65	7,143	1,429	1,905	10,48	0,2382	0,099	0,0023
Fe Elektrodu							
35	5,238	1,429	1,905	8,571	0,3792	0,132	0,0058
50	6,19	1,429	1,905	9,524	0,2506	0,179	0,0047
65	7,143	1,429	1,905	10,476	0,2121	0,237	0,0048

3.4. İşletme maliyeti analizi (Operating Cost Analysis)

En iyi giderim veriminin sağlandığı akım yoğunluğı olan $65 A/m^2$ 'de toplam Al elektrot için

işletme maliyeti $1,14 \$/m^3$ ($0,026 \$/gr$ giderilen fosfor), Fe elektrodu için $0,76 \$/m^3$ ($0,015 \$/gr$ giderilen fosfor) olarak tespit edilmiştir.

65 A/m²'lik akım yoğunluğunda, Al elektrot için toplam işletme maliyetinin yaklaşık % 45' ini elektrot maliyeti, % 38'ini DC güç kaynağı enerji maliyeti, yaklaşık % 7'sini karıştırıcı enerji maliyeti, % 10'unu pompa enerji maliyeti oluşturmaktadır. Fe elektrodu için toplam işletme maliyetinin % 18'ini elektrot maliyeti, % 56'sını DC güç kaynağı enerji maliyeti, yaklaşık % 11'ini

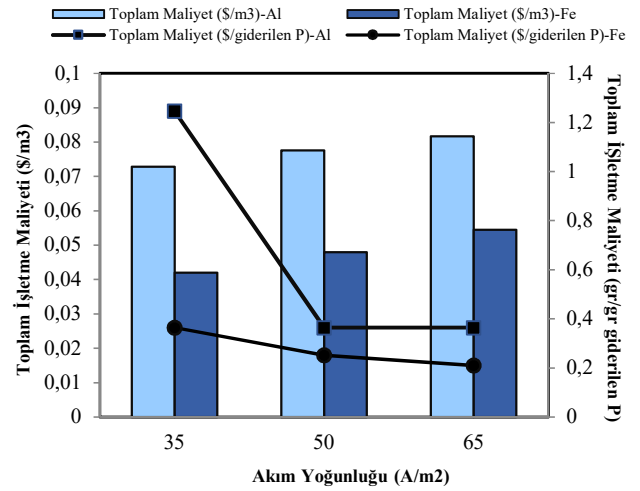
karıştırıcı enerji maliyeti, % 15'ini pompa için harcanan enerji maliyeti oluşturmaktadır (Tablo 5). Toplam maliyet açısından bakıldığında fosfor giderimi için Fe elektrodunun Al elektrodundan yaklaşık % 50 daha düşük maliyet sunduğu belirlenmiştir.

Tablo 5. Farklı akım yoğunluklarında işletme maliyetleri (Operating Costs in different current densities)

Akım Yoğunluğu (A/m ²)	Enerji Maliyeti (\$/m ³)			Toplam Enerji Maliyeti (\$/m ³)	Elektrot Maliyeti (\$/m ³)	Toplam Maliyet (\$/m ³)	Toplam Maliyet (\$/gr giderilen fosfor)
	DC Güç Kaynağı	Karıştırıcı	Pompa				
Al Elektrodu							
35	0,31	0,085	0,114	0,511	0,507	1,019	0,089
50	0,37	0,085	0,114	0,568	0,518	1,086	0,026
65	0,43	0,085	0,114	0,625	0,518	1,143	0,026
Fe Elektrodu							
35	0,31	0,085	0,114	0,511	0,077	0,588	0,026
50	0,37	0,085	0,114	0,568	0,104	0,672	0,018
65	0,43	0,085	0,114	0,625	0,137	0,762	0,015

Şekil 7 'de, 1 m³ atıksudan fosfor giderimi için toplam işletme maliyeti ve giderilen fosfor başına toplam işletme maliyeti verilmiştir. Akım yoğunluğunun artması ile sisteme verilen enerjinin artarak, daha fazla elektrot materyali çözünmesine neden olduğundan, m³ başına toplam işletme maliyetinin arttığı, buna karşın, düşük akım yoğunluklarında giderimin düşük olması sonucunda ise, akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte, giderilen gr fosfor için toplam maliyetin azaldığı belirlenmiştir.

Akım yoğunluğunun artması ile sisteme verilen akımın artarak DC güç kaynağının harcadığı enerjinin artmasına ve buna bağlı olarak daha fazla elektrot materyali çözünmesine neden olduğundan, m³ başına toplam işletme maliyetinin arttığı görülmüştür. Buna karşın, akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte, giderilen gr fosfor için toplam maliyet azalmıştır (Şekil 7).



Şekil 7. Akım yoğunluğunun İşletme maliyetine etkisi (Effect of current density on operating cost)

3.5. Reaktör kinetiğinin belirlenmesi (Determination of Reactor Kinetic)

EK prosesinin reaksiyon kinetiğinin belirlemek amacı ile 0., 1. ve 2. derece kinetik modelleri için R² değerleri tespit edilmiştir. Buna göre, ortofosfat ve toplam fosfor giderimlerinin 2. derece reaksiyon kinetiğine uyduğu belirlenmiştir (Tablo 6). Literatürde patates cipsi üretimi atıksularından Al elektrodunu kullanarak yaptıkları EK prosesi ile KOİ giderimi yapılan çalışmada reaksiyon

kinetiğinin 2. derece olduğunu belirlemiştirlerdir [33].

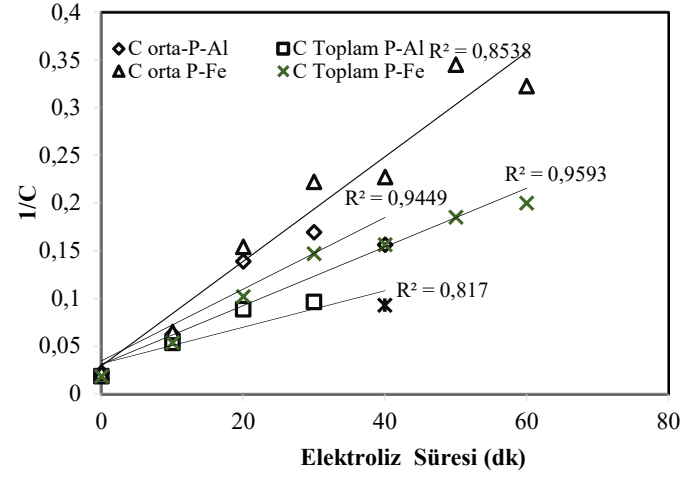
Tablo 6. Sürekli akışlı EK model reaktörü için R^2 değerleri (R^2 values for the continuous flow EC Model Reactor)

Al Elektrot		
Kinetik Derecesi	$C_{\text{ortofosfat}}$ (mg/L)	$C_{\text{Toplam Fosfor}}$ (mg/L)
0	0,69	0,64
1	0,81	0,74
2	0,85	0,82

Fe Elektrot		
Kinetik Derecesi	$C_{\text{ortofosfat}}$ (mg/L)	$C_{\text{Toplam Fosfor}}$ (mg/L)
0	0,59	0,64
1	0,83	0,81
2	0,96	0,95

Al elektrodu için 2. derece reaksiyon kinetiği için elde edilen R^2 değerleri ve denklemler, Şekil 8’de verilmiştir. Toplam fosfor giderimi için 2. derece reaksiyon kinetiği hız sabitinin $1.9 \times 10^{-3} \text{ dk}^{-1}$ olarak bulunurken, ortofosfat için bu değer $3.8 \times 10^{-3} \text{ dk}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Reaksiyon hız sabitlerine bakıldığında, ortofosfatın, toplam fosfora göre daha hızlı giderildiği görülmektedir.

Fe elektrodu için 2. derece reaksiyon kinetiği için elde edilen R^2 değerleri ve denklemler, Şekil 8’de verilmiştir. Toplam fosfor giderimi için 2. derece reaksiyon kinetiği hız sabitinin $3.1 \times 10^{-3} \text{ dk}^{-1}$ olarak bulunurken, ortofosfat için bu değer $5.5 \times 10^{-3} \text{ dk}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Reaksiyon hız sabitlerine bakıldığında, ortofosfatın, toplam fosfora göre daha hızlı giderildiği belirlenmiştir.



Şekil 8. 2. Derece Reaksiyon Kinetiği (2nd order Reaction Kinetics)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir;

- Sürekli akışlı EK prosesi ile patates cipsi üretim atıksularından fosfat gideriminde Al elektrot türü için optimum elektroliz süresi 40 dk, Fe elektrot türü için 60 dk olarak tespit edilmiştir. Akım yoğunluğunun toplam fosfor ve ortofosfat giderim verimlerine etkisine bakıldığında en yüksek toplam fosfor giderim verimi % 81 olarak, akım yoğunluğunun 65 A/m^2 olduğu ve 30 dk’lık elektroliz süresinde; Fe elektrot için bu değer % 91 olarak akım yoğunluğunun 65 A/m^2 olduğu ve 60 dk’lık elektroliz süresinde elde edilmiştir. Bu anlamda, Fe elektrodunun kullanıldığı EK prosesi Al elektrodunun kullanıldığı prosese göre daha yüksek giderim verimleri elde etmiştir.
- Al elektrodunun kullanıldığı sürekli akışlı EK model reaktörü için en yüksek toplam giderim veriminin elde edildiği 65 A/m^2 akım yoğunluğunda toplam işletme maliyeti $1,14 \text{ \$/m}^3$, Fe elektrodu için $0,76 \text{ \$/m}^3$ olarak tespit edilmiştir. Buna göre, Fe elektrodu, Al elektroduna göre yaklaşık % 50 oranında daha düşük maliyet sunmaktadır. Toplam işletme maliyetine bakıldığında, Al elektrodunun, Fe elektroduna göre daha pahalı olduğu belirlenmiştir. Aslında, elektrot ve enerji tüketimi bakımından Al elektrodu, Fe elektroduna göre daha az elektrot materyali tüketmesine karşın, Al elektrodunun kg fiyatının pahalı oluşu, toplam işletme maliyetinin yüksek olmasına neden olmuştur. Sürekli akışlı EK prosesi ile fosfor gideriminde toplam maliyetin % 50’den daha fazlası sisteme verilen enerjiden

(DC güç kaynağı) kaynaklanmaktadır. Bu maliyetin minimize edilmesi ile EK prosesi işletme maliyetinin önemli ölçüde minimize edilebileceği düşünülmektedir.

• Al elektrodunun kullanıldığı EK prosesi sonrası 65 A/m² akım yoğunluğunda, 30 dk'lık sürede elde edilen çıkış suyu toplam fosfor konsantrasyonu 10,4 mg/L, ortofosfat konsantrasyonu 5,9 mg/L'dir. Fe elektrodunun kullanıldığı EK prosesi uygulaması ile 65 A/m² akım yoğunluğunda, 60 dk'lık sürede elde edilen çıkış suyu toplam fosfor konsantrasyonu 5,0 mg/L, ortofosfat konsantrasyonu 3,1 mg/L olarak elde edilmiştir.

• Al elektrot bağlantı sisteminin kullanıldığı sürekli akışlı EK model reaktörü ile en yüksek fosfor giderimlerinin sağlandığı şartlarda atıksu çıkış pH değeri 7,13 olarak; Fe elektrot bağlantı sisteminde ise 8,15 olarak tespit edilmiştir. Buna göre, sürekli akışlı EK model reaktörü ile elde edilen çıkış suyu deşarj standartlarını sağlamakta ve deşarj için pH ayarlaması yapılmasına gerek duyulmamaktadır. EK prosesinde oluşan hidroksitler nedeniyle, çözelti pH'sı ne olursa olsun, çıkış suyu pH değerinin nötrale olma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.



KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. M. Uğurlu, The Removal of Some Inorganic Compounds from Paper Mill Effluents by the Electrocoagulation Method. G.U. Journal of Science, 17(3), 85-99, 2004.
- [2]. A. Günay, E. Debik, Evsel Atıksulardan Biyolojik Nutrient Giderimi. I. Atıksu Sempozyumu, 22-24 Haziran, Kayseri, 57-63, 1998.
- [3]. S.E. Manahan, Frontmatter, Fundamentals of Environmental Chemistry. Boca Raton, CRC Press LLC, 352p, 2001.
- [4]. A. Samsunlu, 2006. Atıksuların Arıtılması. Birsen Yayınevi, 644s, İstanbul.
- [5]. V.L. Snoeyink, D. Jenkins, Water Chemistry, John-Wiley and Sons, 451p, United States of America, 1980.
- [6]. E. Oğuz, A. Gürses, N. Canplat, Removal of Phosphate from Wastewaters. Cement and Concrete Research, 33, 1109-1112, 2003.
- [7]. B. Kıvanç, Adsorpsiyon ve İyon Değişimi Yöntemi ile Sulu Çözeltilerden Fosfat Gideriminin İncelenmesi. Osmangazi

Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 147s, Eskişehir, 2011.

- [8]. D. Dolar, K. Kosutic, B. Vucic, RO/NF Treatment of Wastewater from Fertilizer Factory: Removal of Fluoride and Phosphate. Desalination, 265, 237-241. 2011.
- [9]. T. Tunçal, Management of Phosphorus Removal in Municipal Wastewater Treatment Plants. chenuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.d. Thesis, 242p, İzmir, 2008.
- [10]. S. Tanada, M. Kabayama, N. Kawasaki, T. Sakiyama, T. Nakamura, M. Araki, T. Tamura, Removal of Phosphate by Aluminum Oxide Hydroxide. Journal of Colloid and Interface Science, 257,135-140, 2003.
- [11]. Ş. İrdemez, N. Demircioğlu, Y.Ş. Yıldız, The Effects of pH on Phosphate Removal from Wastewater by Electrocoagulation with Iron Plate Electrodes. Journal of Hazardous Materials, B137, 1231-1235, 2006.
- [12]. Metcalf and Eddy, Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse, Third Edition, McGraw-Hill Inc., Civil Engineering Series, 1334p, New York, 1991.
- [13]. M.F. Pouet, A. Grasmick, Urban Wastewater Treatment by Electrocoagulation and Flotation. Water Science Technology, 31, 275-283, 1995.
- [14]. E.A. Vik, D.A. Carlson, A.S. Eikum, E.T. Gjessing, Electrocoagulation of Potable Water. Water Reserach, 18, 1355-1360, 1984.
- [15]. J.S. Do, M.L. Chen, Decolourisations of Dye-Containing Solutions by Electrocoagulation, Journal of Applied Electrochemistry, 24, 785-790, 1994.
- [16]. American Public Health Association (APHA), Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater (19th ed.), Washington, 2005.
- [17]. <http://www.epdk.org.tr/TR/Dokumanlar/TDB/Elektrik>
- [18]. <http://metalavm.com/aluminyum-plaka>

- [19]. <http://www.lme.com.tr/teklifhazirla.php?id=697> Engineering Processing, 47, 1211-1223, 2008.
- [20]. A. Dedeli, Fosfatlama Banyosu Atıksularının Elektrokimyasal Arıtımı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 120s, Gebze, 2008.
- [21]. M. Kobyas, E. Demirbaş, A.Dedeli, M.T. Şensoy, Treatment of Rinse Water form Zinc Phosphate Coating by Batch and Continuous Electrocoagulation Processes. Journal of Hazardous Materials, 173, 326-334, 2010.
- [22]. M. Behbahani, M.R. Moghaddam Alavi, M, Arami, A Comparison between Aluminum and Iron Electrodes on Removal of Phosphate from Aqueous Solutions by Electrocoagulation Process. International Journal of Environmental Research, 5(2), 403-412, 2011.
- [23]. Ş. İrdemez, N. Demircioğlu, Y.Ş. Yıldız, Z. Bingül, The Effects of Current Density and Phosphate Concentration on Phosphate Removal from Wastewater by Electrocoagulation Using Aluminum and Iron Plate Electrodes. Separation and Purification Technology, 52, 218-223, 2006.
- [24]. M. Rebhun, M., Lurie, Control of Organic Matter by Coagulation and Flocculation. Water Science and Technology, 27(11), 1-20.1993.
- [25]. M.Y.A. Mollah, P. Morkovsky, J.A.G. Gomes, M.Kesmez, J. Parga, D.L. Cocke, Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation. Journal of Hazardous Materials, B114, 199-210, 2004.
- [26]. M. Bayramoğlu, M. Eyvaz, M. Kobyas, Treatment of the Textile Wastewater by Electrocoagulation: Economical Evaluation, Chemical Engineering. Eng. J., 128, 155-161, 2007.
- [27]. A.H. Essadki, M. Bennajah, B. Gourich, C. Vial, M. Azzi, H. Delmas, Electrocoagulation/Electroflotation in an External-Loop Airlift Reactor-Application to the Decolorization of Textile Dye Wastewater: A Case Study. Chemical
- [28]. J. Jiang, N. Graham, C. Andre, G. Kelsall, N. Brandon, Laboratory study of Electrocoagulation-Flotation for Water Treatment. Water Research, 36, 4064-4078, 2002.
- [29]. Z. Karcioğlu Karakaş, M.T. Yılmaz, A.E. Yılmaz, Endüstriyel Atıksulardan Sülfat Koagülantı Kullanılarak Kimyasal Koagülasyon Yöntemi ile Bor Giderimi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2(1), 15-22, 2012.
- [30]. P.N. Endyuskin, S.V.Selezenkin, K.M. Dyumaev, Electrochemical purification of wastewaters from production of organic-dyes. Journal of Applied Chemistry, 56, 1100-1102, 1983.
- [31]. A.E. Wilcock, Textile Chem. Colorist, 24(11), 29, 1992.
- [32]. M.Y.A. Mollah, R. Schennach, J.R. Parga, D.L. Cocke, Electrocoagulation (EC) Science and Applications. Journal of Hazardous Materials, 84, 29-41, 2001.
- [33]. M. Kobyas, H. Hiz, E. Şentürk, C. Aydın, E. Demirbaş, Treatment of Potato Chips Manufacturing Wastewater by Electrocoagulation. Desalination, 190, 201-211, 2006.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 17-01-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 24-11-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.286225	

Seçilen şehirler için ısıtma derece-saat hesabı

Şaban Pusat ^{*1}, Mustafa Tahir Akkoyunlu ²

ÖZ

Bu çalışmada, uzun yıllara (1989-2008) ait meteorolojik veriler kullanılarak elde edilen tipik meteorolojik yıl verileri ile hesaplanan aylık ve yıllık ısıtma derece-saat değerleri sunulmuştur. Isıtma derece-saatlerin hesaplamasında dokuz farklı referans sıcaklık (17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25 °C) kullanılmıştır. Hesaplamalar, Türkiye'nin farklı iklim bölgelerini temsil eden sekiz şehir merkezi (İstanbul, Ankara, Trabzon, Van, Diyarbakır, Adana, Sivas ve Denizli) için yapılmıştır. Yıllık ısıtma derece-saat değerleri açısından şehirlerin sıralaması en yüksekte en düşüğe doğru Sivas, Van, Ankara, Diyarbakır, İstanbul, Trabzon, Denizli ve Adana olarak belirlenmiştir. Literatürdeki diğer bir çalışma ile yapılan mukayesede % 16.6'lara varan farkların olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Derece-saat, derece-gün, ısıtma, tipik meteorolojik yıl

Heating degree-hour calculation for selected cities

ABSTRACT

In the present study, monthly and annual heating degree hour values were presented, which were calculated by using typical meteorological year data produced from long term (1989-2008) meteorological data. In calculation of heating degree-hours, nine different reference temperatures (17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25 °C) were used. Calculations were done for eight city centers (İstanbul, Ankara, Trabzon, Van, Diyarbakır, Adana, Sivas ve Denizli) representing distinct climatic regions of Turkey. In terms of annual heating degree-hour values, ranking of cities from the highest to the lowest was determined as Sivas, Van, Ankara, Diyarbakır, İstanbul, Trabzon, Denizli and Adana. Difference was established as high as 16.6 % in comparison with another study from the literature.

Keywords: Degree-hour, degree-day, heating, typical meteorological year

* Corresponding Author

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Beşiktaş, İstanbul. spusat@yildiz.edu.tr

² Necmettin Erbakan Üniversitesi, Ereğli Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Ereğli, Konya. makkoyunlu@konya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Derece-gün yöntemi ısıtma ve soğutma hesaplamalarında uzun yıllardır kullanılan basit, kullanışlı ve etkili bir yöntemdir. Birçok değişken parametreyi dikkate almamasından dolayı günümüzde çok fazla kullanılmamaktadır. Bununla birlikte, uygulaması basit olduğundan ve hızlı sonuçlar elde edilebildiğinden ilk değerlendirmeleri yapabilmek için hala kullanılmaktadır. Derece-saat yöntemi ise günlük sıcaklık değerlerine dayanan derece-gün yönteminden farklı olarak saatlik sıcaklık ölçümlerini kullanmaktadır. Dolayısıyla, derece-saat yöntemi derece-gün yöntemine göre daha doğru sonuçlar vermektedir [1].

Derece-saat yöntemi temel olarak dış ortam sıcaklığı ile ısıtılan/soğutulan ortam için belirlenen referans sıcaklık arasındaki farka dayanmaktadır. Dış ortam sıcaklıkları ölçülen değerler iken referans sıcaklık farklı ortamlar için değişkenlik gösterebilmektedir. Ayrıca, ısıtma ve soğutma hesaplamalarında farklı referans sıcaklıklar kullanılır. Binaların yıllık ısıtma/soğutma enerji tüketim tahminlerinde ve binalar için uygun yalıtım kalınlığı belirleme çalışmalarında sıklıkla kullanılan derece-saat yöntemi ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların bazıları tek bir referans sıcaklık değerini kullanırken bazı çalışmalarda değişken referans sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda ise uygun referans sıcaklık değerinin belirlenmesi için tahminler ve analizler yapılmıştır [2].

Durmayaz ve Kadioğlu yaptıkları çalışmada, derece-saat yöntemini kullanarak beş farklı şehir için ısıtma enerjisi ihtiyacı ve yakıt tüketiminin değişimini farklı bina özelliklerine bağlı olarak incelemişlerdir [3]. Isıtma amacıyla tüketilen doğalgaz miktarının en iyi ve en kötü durumlar için şehir merkezlerinde yıllık yaklaşık 17.1 ve 6.5 Gm³ olacağı tahmininde bulunmuşlardır.

Satman ve Yalçinkaya, 77 istasyonun verilerini kullanarak farklı referans sıcaklık değerleri için ısıtma ve soğutma derece-saat hesabı yapmışlardır [4]. Isıtma derece-saat hesabında 15, 17 ve 18.3 °C'yi soğutma derece-saat hesabında ise 24, 26, 27 ve 30 °C'yi referans sıcaklık olarak kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar tablo ve haritalarla sunulmuştur.

Yunanistan'ın iki büyük şehri için yapılan çalışmada, farklı referans sıcaklık değerleri için

ısıtma ve soğutma derece-saatler hesaplanmıştır [5]. Isıtma derece-saat için 10-20 °C aralığını soğutma derece-saat için ise 20-27.5 °C aralığını yarım derecelik artış değerleriyle referans sıcaklık olarak kullanmışlardır. Elde edilen sonuçların enerji hesaplamalarında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Oktay vd. yaptıkları çalışmada, gün içerisindeki sıcaklık dalgalanmalarını tahmin eden yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir [6]. Geliştirdikleri bu yöntemi Türkiye'nin farklı coğrafik noktalarındaki 58 şehrin soğutma derece-saatlerini hesaplamada kullanmışlar ve iyi sonuçlar elde ettiklerini belirtmişlerdir.

Pusat ve Ekmekçi yaptıkları çalışmada, İstanbul için farklı referans sıcaklık değerleri için ısıtma/soğutma derece-saat hesaplamalarını yapmışlardır [7]. Çalışma, İstanbul'un farklı noktalarındaki dört adet istasyonun verileri için yapılmıştır. Isıtma ve soğutma için aynı referans sıcaklık değerlerini (17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25 °C) kullanmışlardır. Aynı şehir içerisinde bile ısıtma-soğutma ihtiyacının değişkenlik gösterebileceği gösterilmiştir. Diğer bir çalışmada ise, Karabük için 12 yıllık dış ortam sıcaklık ölçüm verileri kullanılarak derece-saat ve derece-gün hesaplamaları yapılmıştır [8]. Referans sıcaklık olarak 5, 10 ve 15 °C kullanılmış ve sonuçlar her yıl için ayrı ayrı verilerek değerlendirmeler yapılmıştır.

Bolattürk'ün çalışmasında, derece-saat yöntemi dış duvarlar için optimum yalıtım kalınlığının belirlenmesinde kullanılmıştır [9]. Çalışma, Türkiye'deki 7 şehir ve farklı referans sıcaklıklar (ısıtmada 14-16-18-20-22 °C ve soğutmada 18-20-22-24-26 °C) için yapılmıştır. Optimum yalıtım kalınlığının 1.6-2.7 cm aralığında değiştiği belirlenmiştir.

Kürekeçi'nin çalışmasında ise, Türkiye'deki 81 şehir için optimum yalıtım kalınlıkları farklı yakıt türleri ve yalıtım malzemelerine bağlı olarak belirlenmiştir [10]. Yıllık enerji tüketimi hesabında ise derece-gün değerleri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre doğalgazın kullanıldığı durumlarda yalıtım kalınlığının daha az çıktığı belirtilmiştir.

Büyükalaca vd. yaptıkları çalışmada, Türkiye'deki 78 istasyonun için ısıtma ve soğutma derece-günleri hesaplamışlardır [11]. Isıtma derece-saat hesabında 14, 16, 18, 20 ve 22 °C'yi soğutma derece-saat hesabında ise 18, 20, 22, 24, 26 ve 28 °C'yi referans sıcaklık olarak kullanmışlardır. Elde

edilen sonuçlar tablo ve haritalarla tüm Türkiye için sunulmuştur.

Literatür incelendiğinde, gerek derece-gün gerekse derece-saat ile ilgili birçok çalışma mevcuttur. Farklı referans sıcaklık değerleri için hesap yapan çalışmalar olduğu gibi tek bir referans sıcaklık değeri için hesap yapan çalışmalar da mevcuttur. Bu çalışmaların bazılarında her yıl için ayrı ayrı derece-gün ya da derece saat hesabı yapılırken bazılarında ise uzun yılların ortalaması kullanılarak hesaplar yapılmıştır. Son yıllardaki bina ısıtma/soğutma enerji tüketimi hesaplamaları ile ilgili çalışmalar incelendiğinde, artık yıllık meteorolojik veriler kullanmak yerine o bölgeyi temsil eden tipik meteorolojik yıl (TMY) verilerinin oluşturularak hesaplamalarda kullanılması yoluna gidilmektedir [12]. Bu çalışmada, Türkiye'nin farklı iklimsel özelliklerini gösteren 8 şehri için TMY verileri [12] kullanılarak ısıtma derece-saatleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda referans sıcaklık olarak 17, 18,

19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25 °C kullanılmıştır. Sonuçlar aylık ve yıllık olarak sunulmuştur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Türkiye'de 4 ısıtma derece-gün bölgesi bulunmaktadır [13]. Ancak, Türkiye'nin 4 ısıtma derece-gün bölgesine ayrılması çok kaba bir yaklaşımla olarak karşımıza çıkmaktadır [14] [15]. Bu çalışmada kullanılan meteorolojik veriler, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınmıştır ve Türkiye'nin farklı iklim karakteristiklerini gösteren 8 şehre aittir [12]. Bu şehirler sırasıyla İstanbul, Ankara, Trabzon, Van, Denizli, Diyarbakır, Adana ve Sivas'tır. Seçilen şehirlerle ilgili genel bilgiler Tablo 1'de sunuldu. Ortalama sıcaklık değerlerine bakıldığında en sıcak şehrin Adana (19.1 °C) ve en soğuk şehrin Sivas (9.1 °C) olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Seçilen şehirler için genel bilgiler (General information for selected cities) [12]

Şehir	Ortalama Sıcaklık (°C)	Enlem (°N)	Boylam (°E)	Rakım (m)	Veri Aralığı
İstanbul	15.0	41.14	29.05	33	1989-2006
Ankara	12.0	39.58	32.51	891	1989-2006
Trabzon	14.7	40.60	39.45	39	1989-2005
Van	9.2	38.28	43.20	1671	1989-2007
Diyarbakır	15.8	37.54	40.12	677	1989-2008
Adana	19.1	37.00	35.20	20	1989-2008
Sivas	9.1	39.44	37.00	1285	1989-2008
Denizli	16.2	37.78	29.08	425	1989-2006

Öncelikle, seçilen şehirler için TMY verileri hazırlandı. TMY çalışması ile ilgili detaylı bilgiler daha önceki çalışmada verilmiştir [12]. TMY yöntemi, bir bölgenin iklim özelliklerini temsil eden ve gerçek ölçüm verilerinden oluşan bir yıllık iklim verisi oluşturulmasıdır. Bu yöntemin temelinde Finkelstein-Schafer istatistiği yatmaktadır. Bu yöntemde, her bir aylık veri o aya ait uzun yılların ortalaması ile mukayese edilir ve ortalamaya en yakın ay TMY verisi olarak seçilir. Bu şekilde 12 ay için en iyi ayların seçimi yapılarak 12 aylık TMY veri seti elde edilmiş olur. Elde edilen TMY verileri kullanım amacına bağlı olarak saatlik, günlük veya aylık olabilir. Bu çalışmada, derece-saat hesabı yapıldığı için saatlik veriler kullanılmıştır. Her bir şehir için seçilen en iyi aylar tablo halinde [12]'de sunulmuştur.

TMY yönteminin amacı uzun yılları temsil eden 1 yıllık iklim verisinin elde edilmesidir. TMY'nin alternatifi olan uzun yılların aritmetik ortalamasının kullanılması durumunda, değişik yıllarda gerçekleşen mevsimsel farklılıkların etkisi elde edilen ortalamanın değişmesine ve bölgeyi temsil etme kapasitesinin düşmesine neden olur. Ayrıca, aritmetik ortalama ile elde edilen verilerin sentetik veriler olması da diğer bir olumsuz yanındır. Ancak, TMY yönteminde farklı yıllardaki mevsimsel farklılıklar en iyi ayların seçimini etkileyemeyeceği için ve kullanılan veriler gerçek ölçüm verileri olduğu için daha çok temsil edici olmaktadır.

Elde edilen saatlik TMY verileri kullanılarak derece-saat hesaplamaları 8 şehir için yapılmıştır. Derece-saat hesaplamasında kullanılan en genel formül şu şekildedir:

$$Derece - saat = \sum(T - T_r)^{\pm} \quad (1)$$

burada T saatlik dış ortam sıcaklığını (°C) ve Tr referans sıcaklık değerini (°C) ifade etmektedir.

Bu çalışmada, değişken referans sıcaklık değerleri (17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25 °C) için hesaplamalar yapıldı. İki sıcaklık değeri arasındaki fark (T - Tr) sıfırdan büyükse soğutma-derece saat, sıfırdan küçükse ısıtma-derece saat olarak hesaplamalara katılır.

$$Isıtma Derece - saat = \sum(T - T_r)^{-} \quad (2)$$

$$Soğutma Derece - saat = \sum(T - T_r)^{+} \quad (3)$$

Bu çalışmada sadece ısıtma derece-saat hesabı yapıldığı için farkın sıfırdan küçük olduğu durumlar dikkate alındı. Hesaplamalar saatlik olarak yapılarak aylık ve yıllık olarak 8 şehir için sunuldu.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Saatlik TMY verileri kullanılarak Türkiye'nin farklı iklimsel özelliklerini yansıtan 8 şehir merkezi için aylık ve yıllık ısıtma derece-saat değerleri hesaplandı. Elde edilen sonuçlar Tablo 2-9'da sunuldu.

Yıllık derece-saat değerleri incelendiğinde beklendiği üzere, en yüksek değerler en soğuk şehir olan Sivas ve en düşük değerler ise en sıcak şehir olan Adana için hesaplandı. Ayrıca, şehirlerin ısıtma derece-saat değerleri açısından

sıralaması referans sıcaklık değerindeki değişimden bağımsız olarak değişkenlik göstermemektedir. Yıllık ısıtma derece-saat değeri açısından şehirlerin sıralaması en yüksekte en düşüğe doğru Sivas, Van, Ankara, Diyarbakır, İstanbul, Trabzon, Denizli ve Adana şeklindedir. Aylık ısıtma derece-saat değerleri bazı şehirlerde (Adana, Denizli, Diyarbakır, İstanbul ve Trabzon) sıfır olabilirken bazı şehirlerde (Van, Ankara ve Sivas) hiç sıfıra inmemektedir.

Referans sıcaklığın 21 °C olduğu durum için Adana'nın ısıtma derece-saat değeri 43615 iken Sivas'ın ısıtma derece-saat değeri 120719 olarak hesaplandı. Sivas ve Adana'nın ısıtma derece-saatleri arasında yaklaşık 3 kat fark olduğu belirlendi. Adana'nın aylık ısıtma derece-saat değerleri 0 (Ağustos) ile 8535 (Aralık) arasında değişirken Sivas'ın ki 1717 (Ağustos) ile 19009 (Aralık) aralığında değişmektedir.

Elde edilen aylık ve yıllık ısıtma derece-saat verileri literatür ile mukayese edilebilir. Mukayese için en uygun çalışma Satman ve Yalçinkaya'nın [4] Türkiye'nin 77 noktası için yaptığı çalışmadır. Bu çalışmada sadece yıllık ısıtma derece-saat değerleri 15, 17 ve 18.3 °C referans sıcaklıklar için verilmiştir. Söz konusu çalışmada belirtilmemiş olmakla birlikte derece-saat değerleri yaklaşık 6 yıllık (1991-1996) veri kullanılarak yapılmıştır. Mukayese yapılırken bu çalışmada değerlendirmeye alınan 8 şehrin 17 °C referans sıcaklık için elde edilen yıllık ısıtma derece-saatler kullanıldı. Elde edilen sonuçların mukayesesi Tablo 10'da verildi.

Tablo 2. İstanbul için ısıtma derece-saat değerleri (Heating degree-hour values for İstanbul)

Referans Sıcaklık (°C)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
17	8812	7395	8032	5689	1287	245	0	22	645	2713	5971	8125	48936
18	9556	8067	8776	6368	1787	406	2	59	932	3282	6667	8863	54764
19	10300	8739	9520	7054	2346	614	6	184	1285	3890	7378	9604	60919
20	11044	9411	10264	7747	2963	888	29	419	1712	4527	8096	10347	67443
21	11788	10083	11008	8453	3614	1243	77	754	2194	5203	8816	11091	74323
22	12532	10755	11752	9165	4286	1652	211	1176	2723	5910	9536	11835	81533
23	13276	11427	12496	9883	4981	2117	455	1679	3295	6633	10256	12579	89077
24	14020	12099	13240	10602	5697	2631	807	2245	3901	7369	10976	13323	96909
25	14764	12771	13984	11322	6429	3182	1238	2867	4540	8110	11696	14067	104968

Tablo 3. Ankara için ısıtma derece-saat değeri (Heating degree-hour values for Ankara)

Referans Sıcaklık (°C)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
17	13024	10225	9902	4903	3308	973	66	241	955	3538	9896	11203	68233
18	13768	10894	10646	5559	3806	1286	133	349	1332	4119	10614	11947	74453
19	14512	11565	11390	6232	4341	1640	235	485	1754	4728	11333	12691	80906
20	15256	12237	12134	6922	4902	2029	390	654	2229	5362	12053	13435	87603
21	16000	12909	12878	7622	5495	2455	604	877	2743	6018	12773	14179	94553
22	16744	13581	13622	8331	6111	2915	876	1159	3291	6697	13493	14923	101742
23	17488	14253	14366	9049	6750	3411	1198	1503	3870	7399	14213	15667	109168
24	18232	14925	15110	9769	7410	3940	1569	1894	4488	8111	14933	16411	116791
25	18976	15597	15854	10489	8094	4510	1985	2322	5133	8829	15653	17155	124596

Tablo 4. Trabzon için ısıtma derece-saat değeri (Heating degree-hour values for Trabzon)

Referans Sıcaklık (°C)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
17	7317	7046	7836	5657	1536	225	3	0	725	1182	6077	7769	45373
18	8053	7683	8568	6374	1960	373	22	1	1070	1573	6782	8502	50961
19	8795	8327	9304	7094	2457	605	107	15	1500	2034	7493	9241	56971
20	9538	8973	10042	7814	3027	931	279	61	2023	2537	8210	9985	63420
21	10282	9628	10784	8534	3658	1350	555	158	2610	3087	8930	10729	70306
22	11026	10293	11528	9254	4335	1846	945	345	3257	3672	9650	11473	77623
23	11770	10960	12272	9974	5034	2421	1433	640	3937	4292	10370	12217	85319
24	12514	11627	13016	10694	5743	3069	2018	1029	4633	4946	11090	12961	93339
25	13258	12295	13760	11414	6458	3760	2684	1492	5347	5621	11810	13705	101606

Tablo 5. Van için ısıtma derece-saat değeri (Heating degree-hour values for Van)

Referans Sıcaklık (°C)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
17	14834	12913	10611	7295	4675	1140	127	31	1648	3999	9296	13923	80493
18	15578	13585	11355	8015	5383	1480	221	84	2021	4652	10016	14667	87058
19	16322	14257	12099	8735	6102	1866	358	199	2433	5339	10736	15411	93858
20	17066	14929	12843	9455	6831	2296	542	369	2881	6046	11456	16155	100869
21	17810	15601	13587	10175	7567	2780	778	593	3384	6767	12176	16899	108117
22	18554	16273	14331	10895	8305	3322	1065	862	3936	7495	12896	17643	115577
23	19298	16945	15075	11615	9046	3916	1408	1181	4530	8233	13616	18387	123250
24	20042	17617	15819	12335	9789	4560	1809	1551	5165	8976	14336	19131	131129
25	20786	18289	16563	13055	10533	5240	2274	1964	5838	9720	15056	19875	139192

Tablo 6. Diyarbakır için ısıtma derece-saat değeri (Heating degree-hour values for Diyarbakır)

Referans Sıcaklık (°C)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
17	11952	9435	6261	4707	1865	249	0	0	390	1419	7266	10814	54358
18	12696	10107	6932	5303	2350	385	0	0	544	1811	7906	11558	59592
19	13440	10779	7621	5934	2861	565	0	0	719	2253	8563	12302	65038
20	14184	11451	8322	6586	3413	773	0	4	926	2731	9243	13046	70678
21	14928	12123	9040	7248	4003	1033	6	11	1164	3245	9946	13790	76538
22	15672	12795	9768	7920	4629	1336	23	32	1435	3791	10659	14534	82594
23	16416	13467	10505	8604	5282	1681	63	65	1742	4369	11378	15278	88850
24	17160	14139	11247	9302	5960	2071	141	120	2084	4978	12098	16022	95322
25	17904	14811	11991	10007	6654	2495	258	201	2471	5605	12818	16766	101982

Tablo 7. Adana için ısıtma derece-saat değeri (Heating degree-hour values for Adana)

Referans Sıcaklık (°C)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
17	5270	4227	4109	2828	22	0	0	0	17	348	2933	5637	25391
18	5957	4807	4811	3381	59	4	0	0	65	582	3479	6348	29491
19	6666	5419	5531	3968	132	21	0	0	154	895	4050	7065	33901
20	7400	6053	6259	4583	254	71	0	0	282	1256	4641	7797	38597
21	8143	6704	6993	5225	457	158	2	0	464	1675	5258	8535	43615
22	8887	7365	7731	5882	755	284	7	0	701	2149	5896	9278	48936
23	9631	8031	8472	6553	1136	460	26	0	979	2678	6551	10022	54540
24	10375	8701	9213	7232	1576	704	63	4	1311	3254	7221	10766	60421
25	11119	9373	9957	7918	2077	1019	122	18	1695	3865	7907	11510	66582

Tablo 8. Sivas için ısıtma derece-saat değeri (Heating degree-hour values for Sivas)

Referans Sıcaklık (°C)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
17	15502	13205	13293	6675	4587	1865	876	536	3510	4503	10666	16033	91251
18	16246	13877	14037	7360	5172	2293	1201	750	4056	5151	11375	16777	98295
19	16990	14549	14781	8060	5786	2763	1574	1020	4623	5816	12089	17521	105572
20	17734	15221	15525	8767	6423	3264	1991	1344	5206	6498	12808	18265	113046
21	18478	15893	16269	9480	7078	3795	2453	1717	5823	7196	13528	19009	120719
22	19222	16565	17013	10199	7756	4354	2949	2127	6459	7910	14248	19753	128554
23	19966	17237	17757	10919	8445	4936	3483	2570	7112	8631	14968	20497	136521
24	20710	17909	18501	11639	9141	5541	4049	3046	7777	9362	15688	21241	144604
25	21454	18581	19245	12359	9842	6172	4646	3556	8454	10098	16408	21985	152800

Tablo 9. Denizli için ısıtma derece-saat değerleri (Heating degree-hour values for Denizli)

Referans Sıcaklık (°C)	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
17	7968	6418	7073	3673	716	60	0	3	186	1374	5541	8428	41440
18	8709	7087	7799	4294	991	120	0	12	297	1679	6176	9172	46337
19	9453	7757	8535	4938	1319	205	2	39	462	2039	6831	9916	51499
20	10197	8429	9277	5598	1700	327	8	98	691	2437	7510	10660	56932
21	10941	9101	10021	6274	2129	492	20	233	974	2880	8201	11404	62672
22	11685	9773	10765	6963	2600	700	57	438	1309	3359	8899	12148	68697
23	12429	10445	11509	7662	3115	956	136	708	1685	3869	9607	12892	75014
24	13173	11117	12253	8369	3667	1260	267	1038	2111	4412	10318	13636	81623
25	13917	11789	12997	9083	4255	1613	458	1427	2577	5009	11035	14380	88542

İki çalışma arasında önemli farklar olduğu tespit edildi. En yüksek fark İstanbul için 7819 derece-saat olarak hesaplanırken en düşük fark ise Diyarbakır için 2594 derece-saat olarak hesaplandı. Yüzdesel olarak ise en yüksek fark Trabzon için % 16.6 olarak hesaplanırken en düşük fark ise Van için % 4.3 olarak hesaplandı.

Bu çalışmada kullanılan saatlik verilerin TMY verileri olması elde edilen sonuçların doğruluğunu ve geçerliliğini artırmaktadır [12] [16] [17] [18]. Ayrıca, TMY verilerinin oluşturulmasında kullanılan veri miktarının daha fazla olması, yakın tarihi kapsamı ve bahsi geçen çalışmadaki yılları kapsamı da bu çalışmanın diğer üstünlükleridir. Dolayısıyla, bu çalışmada elde edilen sonuçların bina ısıtma enerjisi tahminlerinde kullanılması doğruluk ve güvenilirlik açısından daha uygundur.

4. SONUÇ (CONCLUSION)



Bu çalışmanın amacı, Türkiye'nin farklı iklimsel özelliklerini temsil eden 8 farklı şehri için ısıtma derece-saat değerlerinin hesaplanmasıdır. Çalışmada kullanılan saatlik sıcaklık verileri, bina ısıtma/soğutma enerjisi tahminlerinde kullanılan iklim verileri açısından günümüzdeki en güvenilir yöntemlerden olan TMY yöntemi ile elde edilmiştir. TMY çalışmasında kullanılan veriler 1989-2008 yıllarını kapsamaktadır. Derece-saat hesaplamasında farklı referans sıcaklık değerleri (17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 ve 25 °C) kullanıldı. Yıllık ısıtma derece-saat değeri açısından şehirlerin sıralaması en yüksekte en düşüğe doğru Sivas, Van, Ankara, Diyarbakır, İstanbul, Trabzon, Denizli ve Adana şeklindedir. Elde

edilen sonuçlar diğer bir çalışma ile mukayese edildiğinde ciddi farkların (% 4.3-16.6) olduğu tespit edildi. Tablolar halinde sunulan sonuçlar bina ısıtma yükü tahminlerinde kullanılabilir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] C. Coşkun, A novel approach to degree-hour calculation: Indoor and outdoor reference temperature based degree-hour calculation, *Energy*, cilt 35, no. 6, pp. 2455-2460, Haziran 2010.
- [2] D. Lindelöf, Bayesian estimation of a building's base temperature for the calculation of heating degree-days, *Energy and Buildings*, cilt 134, pp. 154-161, Ocak 2017.
- [3] A. Durmayaz ve M. Kadioğlu, Heating energy requirements and fuel consumptions in the biggest city centers of Turkey, *Energy Conversion and Management*, cilt 44, no. 7, pp. 1177-1192, Mayıs 2003.
- [4] A. Satman ve N. Yalcinkaya, Heating and cooling degree-hours for Turkey, *Energy*, cilt 24, no. 10, pp. 833-840, Ekim 1999.
- [5] K. Papakostas ve N. Kyriakis, Heating and cooling degree-hours for Athens and Thessaloniki, Greece, *Renewable Energy*, cilt 30, no. 12, pp. 1873-1880, Ekim 2005.
- [6] Z. Oktay, C. Coskun ve I. Dincer, A new approach for predicting cooling degree-hours and energy requirements in buildings, *Energy*, cilt 36, no. 8, pp. 4855-4863, Ağustos 2011.

- [7] İ. Ekmekçi ve S. Pusat, Calculation of variable base degree-hours for four stations in Istanbul, *NUYEK*, Ankara, 2009.
- [8] S. Pusat, N. Tunç, İ. Ekmekçi ve Y. Yetişken, Degree-Time Calculations for Karabük, *ISITES*, Valencia, Haziran, 2015.
- [9] A. Bolattürk, Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey, *Building and Environment*, cilt 43, no. 6, pp. 1055-1064, Haziran 2008.
- [10] N. A. Kurekci, Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers, *Energy and Buildings*, cilt 118, pp. 197-213, Nisan 2016.
- [11] O. Büyükalaca, H. Bulut ve T. Yılmaz, Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey, *Applied Energy*, cilt 69, no. 4, pp. 269-283, Ağustos 2001.
- [12] S. Pusat, İ. Ekmekçi ve M. T. Akkoyunlu, Generation of typical meteorological year for different climates of Turkey, *Renewable Energy*, cilt 75, pp. 144-151, Mart 2015.
- [13] *TS 825 Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*, Mayıs 2008.
- [14] S. Pusat ve İ. Ekmekci, A study on degree-day regions of Turkey, *Energy Efficiency*, cilt 9, no. 2, pp. 525-532, Nisan 2016.
- [15] S. Pusat ve İ. Ekmekçi, A study on climatic zones of Turkey, *IX. International HVAC+R Technology Symposium*, İstanbul, Mayıs, 2010.
- [16] J. Yingni, Generation of typical meteorological year for different climates of China, *Energy*, cilt 35, pp. 1946-1953, 2010.
- [17] K. Kulesza, Comparison of typical meteorological year and multi-year time series of solar conditions for Belsk, central Poland, *Renewable Energy*, cilt 113, pp. 1135-1140, 2017.
- [18] K. Skeiker ve B. A. Ghani, A software tool for the creation of a typical meteorological year, *Renewable Energy*, cilt 34, no. 3, pp. 544-554, 2009.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Gelis/Received</u> 15-06-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.321697	
	<u>Kabul/Accepted</u> 24-11-2017	<u>Online Access</u>	

Çevre laboratuvarlarından kaynaklanan tehlikeli atıkların yönetimi

Elanur Adar*¹, Fatih İlhan¹

ÖZ

Ülkemizde 45 çevre mühendisliği eğitimi veren üniversite ve 240 akredite çevre laboratuvarı vardır. Bu çevre laboratuvarlarında farklı numunelerde çeşitli analizler yapılmaktadır. Çevre laboratuvarlarında oluşan atıkların büyük çoğunluğu kimyasal atıklar ve biyolojik atıklardan meydana gelmektedir. Ayrıca oluşan bu atıkların büyük yüzdesi tehlikeli ve sıvıdır. Bu laboratuvarlardan oluşan toplam tehlikeli atık miktarı yılda yaklaşık 417000 litredir. Oluşan tehlikeli atıkların yönetimi, insan sağlığına ve çevreye zarar vermeden belirli kurallar çerçevesinde gerçekleştirilmelidir. Bu sebeple, çevre laboratuvarlarında yönetmeliklere uygun atık yönetim planlarının oluşturulması gerekmektedir. Bu plan, gerçekleştirilecek tüm faaliyetleri (eğitim, atık sınıflandırması, sınıflandırılan her bir atık için uygun depolamayı ve bertaraf yöntemleri vb.) ve sorumluları kapsayacak şekilde oluşturulmalıdır. Böylece, çevre laboratuvarları için oluşturulacak atık yönetim planı, oluşan atıkların insan sağlığına ve çevreye uygun şekilde yönetilmesini sağlamış olacaktır.

Anahtar Kelimeler: çevre, laboratuvar, tehlikeli atık, yönetim

Hazardous waste management originated from environmental laboratories

ABSTRACT

Our country has 45 universities with environmental engineering education and 240 accredited environmental laboratories. In these environmental laboratories, various analyzes are carried out in different samples. Most of the wastes generated in environmental laboratories come from chemical wastes and biological wastes. In addition, a large percentage of these wastes is hazardous and liquid phase. The total hazardous waste from these laboratories is approximately 417000 liters per year. The management of hazardous wastes should be carried out within the framework of certain rules without harming human health and the environment. Therefore, it is necessary to establish waste management plans in accordance with regulations in environmental laboratories. This plan should be formed to cover all activities to be carried out (education, waste classification, appropriate storage and disposal methods for each waste classified) and responsibilities. So, the waste management plan for the environmental laboratories will be managed in accordance with the human health and environment.

Keywords: environmental, laboratory, hazardous waste, management.

*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Esenler – İSTANBUL, aelanur@yildiz.edu.tr, aelanur@artvin.edu.tr

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Esenler – İSTANBUL, filhan@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ [INTRODUCTION]

Çevre mühendisliği, doğal kaynakları tüketmek yerine bu kaynakların kullanımını insan ve çevre sağlığına uygun hale getirmek ile ilgilenen mühendislik dalıdır. Çevre mühendisliğinin çalışma alanları su - atık su arıtma, hava kirliliği kontrolü, katı atık bertarafı, toprak kirliliği vb. konulardır. Çevre mühendisliğinin görevi çevresel problemlerin oluşumunu engellemek/azaltmak ve oluşan problemlere sürdürülebilir ve teknolojik çözümler araştırmak, bu çözümleri uygulamak ve gerekli tedbirleri belirlemektir [1]. Türkiye’de Çevre Mühendisliği eğitimi 1975 yılında Ege Üniversitesi’nde başlamıştır. 2011 yılında 35 çevre mühendisliği bölümü bulunmakta iken günümüzde 39 ilde ve toplamda 45 üniversitede çevre mühendisliği bölümü bulunmaktadır [2, 3]. Bu üniversitelerin tamamı devlet üniversitesidir. Çevre laboratuvarlarını, çevre mühendisliği bölümüne sahip üniversitelerdeki laboratuvarlar ve akredite çevre analiz laboratuvarları oluşturmaktadır.

Çevreye artan duyarlılıktan dolayı akredite çevre analiz laboratuvarlarının sayısı da günden güne artmaktadır. Akredite çevre laboratuvarlarında farklı çevresel numuneler üzerinde çeşitli analizler yapılmaktadır. Türkiye’de 240 akredite çevre laboratuvarı vardır. Bu akredite laboratuvarlar 35 şehirde olup İstanbul, Ankara ve Kocaeli illerinde sırasıyla 70, 45 ve 18 tane akredite çevre laboratuvarı bulunmaktadır. Bu laboratuvarlarda atıksu, içme suyu, deniz suyu, havuz suyu, katı atık, toprak, arıtma çamuru, sediment, biota, atık yağ, baca gazı (emisyon), çalışma ortamı (imisyon) ve iş hijyeni kapsamında çeşitli parametreler farklı yöntemlere göre analiz edilmektedir [4].

Çevre laboratuvarlarında oluşan atıkların miktarları az fakat çok farklıdır ve tehlikeli maddeleri içermektedir. Laboratuvarlarda oluşan katı atıklar düzenli depolamaya gönderilmekte, sıvı atıklar ise lavabolara dökülerek kanalizasyon sistemine karışmaktadır. Özellikle sıvı tehlikeli atıkların lavaboya dökülmesi atık su toplama sisteminde çeşitli olumsuz etkilere sebep olmakta, kanalizasyon sisteminde tehlikeli gazların oluşmasına yol açmakta, arıtma tesislerinde çeşitli arızaların oluşmasına ve kirlilik yükünün artarak arıtma tesisinin işleyişini aksatmakta ve çamur bertarafının zorlaşması gibi olumsuzluklara sebep olmaktadır [5, 6].

Sanayileşmiş ülkelerdeki üniversitelerde atık yönetim sistemi tasarımları 20 yıl önce başlamıştır [7]. Laboratuvar atıklarının etkin yönetimi Avrupa, Amerika ve Uzak Doğu’daki pek çok üniversitede yapılırken ülkemizde etkin olmazsa da bazı üniversiteler kısıtlı atık yönetimi planı uygulamaktadır. Türkiye’de atık yönetim planı uygulayan üniversiteler Ege Üniversitesi ve Anadolu Üniversitesi [8, 9] olup kimya veya kimya-metalurji bölümü kapsamında ise İstanbul Teknik Üniversitesi ve İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü atık yönetim planlarını uygulamaktadır [10, 11].

Amerika’da okul ve üniversitelerin %80’i kurumsal atık yönetim programlarına sahiptir ve en popüler önlemleri ise geri dönüşümdür [12]. Yapılmış birçok atık yönetim çalışmaları tüm üniversite kapsamında veya sadece kimya bölümü kapsamında gerçekleştirilmiştir. Geng vd., [5] Çin’de Shenyang Üniversitesi’nde “yeşil üniversite” oluşturmak için etkili bir atık yönetim sistemi kurulmasını ve özel laboratuvarlardan oluşan tehlikeli ve toksik atıkların güvenli bir şekilde toplanması, arıtılması ve bertaraf edilmesi gerektiğini ifade etmişler, ilk adımın ise uygun toplama kaplarının sağlanması ve atık ayırma ile ilgili eğitimin verilmesi olduğunu belirtmişlerdir. Liu vd. eğitim sonrasında atık ayırma oranının %70-80’lerden %95’lere yükseldiğini tespit etmişlerdir. Bu durum çevresel derslerin atık ayırma ve yönetimde önemli etkisinin olduğunu göstermektedir [5, 13]. Danteravanich vd. [14] yaptıkları çalışmada laboratuvar atıklarının yaklaşık %35’inin toplanabilir olduğunu ifade etmişlerdir. Amerikan Kimya Birliği ise laboratuvar atıklarının yaklaşık %40’ını raf ömrünü doldurmuş kimyasalların oluşturduğunu belirtmektedir [15]. Üniversitelerde atık yönetimi için gerçekleştirilen birçok çalışmada en önemli bileşenlerin kağıt-karton, plastik ve organik atıkların olduğu belirlenmiştir [16, 17, 18].

Bu çalışmanın amacı, çevre laboratuvarlarında genel olarak yapılan ve tehlikeli atık içeren analizleri belirlemek ve oluşan tehlikeli atık miktarını yaklaşık olarak belirlemektir. Ayrıca oluşan atıkların yönetmeliklere uygun bir şekilde sınıflandırılması, toplanması, depolanması ve bertaraf edilmesi hakkında bilgi sağlamaktır. Radyoaktif atıklar Türkiye Atom enerjisi Kurumu (TAEK) tarafından, atık piller ise Taşınabilir PİL Üreticileri ve İthalatçıları Derneği (TAP) tarafından ayrı olarak toplandığından çalışma

kapsamında sadece su, atık su ve katı atık göz önünde bulundurulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT [MATERIALS AND METHODS]

2.1. Çevre Mühendisliği Bölümündeki Laboratuvarlar [Laboratories in Environmental Engineering Department]

Çevre Mühendisliği Bölümleri'nde lisans öğrencilerinin eğitime yönelik çevre kimyası, çevre mikrobiyolojisi, fiziksel, kimyasal ve biyolojik temel işlemler, hava kirliliği ve enstrümantal analiz laboratuvarları kullanılırken, ayrıca su ve atıksu arıtımı, katı atık, biyoteknoloji gibi farklı araştırma laboratuvarları bulunmaktadır. Çevre Mühendisliği eğitimi veren üniversiteler dikkate alındığında üniversite laboratuvarlarında yaklaşık 30 fiziksel ve kimyasal parametre analizi ve yaklaşık 7 mikrobiyoloji deneyi (basit-gram boyama, mikroorganizma sayımı, koliform analizi-çoklu tüp ve membrane yöntemi-, salmonella, klorofil-a, zehirlilik/balık biyodenyi) yürütülmektedir. Su-atıksu numunelerinde katı madde (KM), alkalinite-asidite, sertlik, klorür, biyolojik oksijen ihtiyacı (BOİ), kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ), toplam organik karbon (TOK), amonyak (NH₃)/ toplam kjeldahl azotu (TKN), ortofostat/toplam fosfor (TP), ağır metaller, iyonlar, nitrit/nitrat, fenol, yağ-gres, uçucu yağ aside (UYA) ve deterjan analizleri yürütülmektedir. Katı atık numunelerinde su muhtevası, uçucu katı madde, TOK, NH₃/TKN, TP ve ağır metaller analizleri gerçekleştirilmektedir. Hava kirliliği çalışmalarında ise genellikle cihazlar kullanılmaktadır ve yapılan analizler toz partikül madde, gaz emisyon, kükürt dioksit (SO₂), amonyak (NH₃), karbondioksit (CO₂), hidrojen sülfür (H₂S) ve uçucu organik karbon (VOC) dur.

Yapılan bu deneyler dışında temel işlemler laboratuvarlarında genellikle jar testi, kimyasal çöktürme, adsorpsiyon, elektrokimyasal arıtım, filtrasyon, membran ve havalandırma deneyleri yürütülmektedir.

2.2. Çevre Analiz Laboratuvarları [Environmental Analysis Laboratories]

35 ilde bulunan 240 çevre analiz laboratuvarında çeşitli numunelerde farklı deneyler gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada İstanbul, Ankara ve Kocaeli ilinde bulunan 5 farklı çevre

analiz laboratuvarında analizi gerçekleştirilen parametreler dikkate alınmıştır. Bu laboratuvarlarda atık su ve su numunelerinde 80'nin üzerinde, atık, toprak ve arıtma çamuru numunelerinde ise 55'in üzerinde parametrelerin analizi gerçekleştirilmektedir. Analizi gerçekleştirilen mikrobiyolojik parametrelerin sayısı ise 15 olarak belirlenmiştir [4].

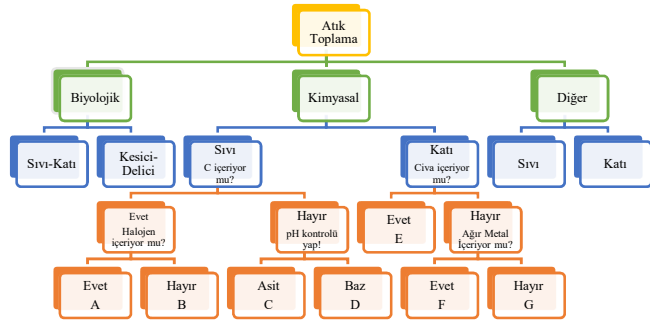
Su, atık su, katı atık ve arıtma çamurunda konvansiyonel parametrelerin (KOİ, BOİ, metaller, TP, TN, TOK, yağ-gres, deterjan, fenol vs.) yanında hidrazin, uçucu organikler (VOC), poliklorobifeniller (PCB), pestisitler, herbisitler, yarı uçucu organikler (sVOC), hidrokarbonlar, BTEX (Benzen, Toluen, Etilbenzen, Ksilen), tributilin bileşikler, organokalay bileşikler, fitalat esterleri (DEHP), toplam ve adsorplanabilen organik bileşiklerin analizleri gerçekleştirilmektedir [4]. Hidrazin (N₂H₄) ısıtma suyu sistemlerindeki çözülmüş oksijeni uzaklaştırmak amacıyla ve pestisit üretiminde kullanılan oldukça kanserojenik ve toksik bileşiktir. Genellikle kuyu veya doğal sulara ve kazan sularında bulunur. Diğer bileşikler sulara bulunan tehlikeli ve öncelikli maddelerdir [1]. Bu maddelerin çoğu "Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği"ndeki Ek 2'deki daha az tehlikeli maddeler sınıfındadır. Aynı yönetmeliğin Ek 1'inde ise çok tehlikeli maddeler yer almakta olup bunlar kadmiyum, civa, heksaklorosikloheksan, karbontetraklorür, DDT, pentaklorofenol, aldrin, dieldrin, endrin, isodrin, heksaklorobenzen, heksaklorobutadin, triklorometan (kloroform), 1,2 dikloroetan, trikloroetilen, perkloroetilen ve triklorobenzendir. Bu maddelerin deşarj limitleri yönetmelikte verilmiştir [19].

Mikrobiyolojik analizler olarak genellikle koloni sayımı, toplam/fekal koliform, pseudomonas aeruginosa, escherichia coli, salmonella, stafilocok, sülfid indergeyen anaerob bakteri (clostridia), giardia, zooplankton-fitoplankton, legionella, beggiatoa, shigella, fekal enterekok ve fekal streptekok gerçekleştirilmektedir [4].

2.3. Atık sınıflandırması [Waste Classification]

Çevre laboratuvarlarında yapılan analizler ve kullanılan analiz metotlarına göre farklı atıklar oluşmaktadır. Bu atıkların çoğunluğunu kimyasal ve biyolojik atıklar oluşturmaktadır. Oluşan bu atıkların yönetimi için yasa ve yönetmeliklere uygun atık yönetim planı oluşturulmalıdır. Oluşturulacak atık yönetim planı, atıkların

sınıflandırmasını, toplanmasını, depolanmasını, bertarafını ve ilgili aşamalardan sorumlu kişileri içermelidir. Laboratuvarlarda oluşan atıkların toplanmasında Şekil 1’de verilen sınıflandırma yöntemi uygulanabilir.



(A: Halojenli organik çözeltiler, B: Halojen içermeyen organik çözeltiler, C: Asidik çözeltiler, D: Bazik çözeltiler, E: Civa ve civa tuzları içeren katılar, F: Zehirli inorganik içeren katılar, G: İnorganik içeren katılar)

Şekil 1. Atık toplama aşamaları [Waste collection stages] [20’den uyarlanmıştır]

Bu sınıflandırmaya göre laboratuvarlarda oluşan atıklar öncelikle atık türüne göre biyolojik, kimyasal ve diğer atıklar olarak 3’e ayrılır.

Biyolojik atıklar, sıvı-katı ve kesici-delici olarak iki gruba ayrılır. Laboratuvarlarda oluşan kesici-delici atıklara örnek olarak iğne, mikroskop lam ve lamelleri, mikrobiyoloji laboratuvarındaki kırık cam malzemeler verilebilir [9].

Kimyasal atıklar, öncelikle sıvı ve katı olmak üzere iki ana gruba ayrılmalıdır. Daha sonra sıvı atıklar kendi içerisinde karbon içeriğine göre tekrar sınıflandırılır. Organik içeriğe sahip sıvı atıklar halojen içeriyorsa “A”, halojen içermiyorsa “B” olarak sınıflandırılmalıdır. Organik içermeyen sıvı atıklar ise pH’ına göre alt sınıflara ayrılarak asidik olanlar “K”, bazik olanlar ise “L” olarak gruplandırılır. Kimyasal katı atıklar ise civa içeriyorsa “G” olarak sınıflandırılır. Bu atıklar civa içermiyorsa ağır metal içeriğine göre ağır metal içeren kimyasal katı atıklar “E”, içermeyenlerse “I” olarak gruplandırılır [20]. Bir atığın tehlikeli atık olup olmadığı Tehlikeli Atık Yönetmeliği [21] ve kimyasalların malzeme güvenlik bilgi formuna (MSDS) göre belirlenebilir.

Diğer atıklar, elektronik atıklar, piller, radyoaktif atıklar vb. laboratuvarlarda oluşan farklı atıklar bu sınıfta gruplandırılabilir. Çoğu su ve atıksu laboratuvarları radyoaktif maddeler ile çalışmaz. Piller, radyoaktif atıklar ve elektronik malzemelerin geri dönüşümleri TAP, TAEK ve elektronik atıkların geri dönüşümünü yapan firmalarla gerçekleştirilmektedir. Radyoaktif

atıklar, konsantrasyon ve aktif kaldıkları süreye göre sınıflandırılırlar. Sıvı atıklar, çözünmeyen katı veya tortu içerdiği takdirde önce filtrelenmelidir ve yeterince (10 kat) su ile seyreltilerek deşarj edilmelidir. Radyoaktif katı atıklar ise radyasyon geçirmeyen toplama kabında biriktirilir. Bu toplama kabı üzerinde gerekli bilgiler olmalıdır [9]. Düşük aktiviteye sahip sıvılar alıcı ortama seyreltilerek verilebilirken yüksek aktiviteye sahip sıvılar çeşitli fiziksel-kimyasal prosesler ile artılmalıdır.

3. SONUÇLAR [RESULTS]

3.1. Çevre Laboratuvarlarında Oluşan Atıklar [Wastes Generated in Environmental Laboratories]

Çevre laboratuvarlarında oluşan biyolojik atıklar sterilizasyonu gerçekleştirildikten sonra çöpe atılabilir. Diğer atıklar grubundaki cihazlar ve piller ayrı bir şekilde toplanıp geri dönüşümü sağlanmaktadır. Dolayısıyla çevre laboratuvarlarında oluşan kimyasal özellikle de tehlikeli kimyasal atıkların toplanması, depolanması ve bertarafının uygun yapılması daha büyük önem arz etmektedir.

3.1.1. Yürütülen Deneylerde Oluşan Tehlikeli Atıklar [Hazardous Wastes Generated in Experiments Carried Out]

Çevre laboratuvarlarında oluşan tehlikeli kimyasal atıklar yürütülen deneylerde oluşan atıklar ve diğer atıklar olarak iki gruba ayrılabilir. Deneyler sonucu oluşan atıklar deneyler için hazırlanılıp kullanılmayan çözeltileri ve analiz sonucu oluşan atıkları içermektedir. Diğer atıklar ise tehlikeli atıklarla kirlenmiş atıkları içermektedir. Çevre laboratuvarlarında tehlikeli madde içeren analizlerin adları ve tehlikeli atıkların adları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Tehlikeli madde içeren analizler [Analyses involving dangerous substances]

Analizler	Tehlikeli Atık	Miktar,m l	Analizler	Tehlikeli Atık	Miktar,m l
KoI	Dikromat çözeltisi, gümüşlü sülfürik asit çözeltisi, standart potasyum dikromat çözeltisi (Hg, Cr, Ag)	50	Sülfat	BaCl ₂ çözeltisi, gümüş nitrat – nitrik asit reaktif	100
Metaller	Standart metal çözeltileri ve analiz sonucu metaller	100	TP	Amonyum molibdat çözeltisi, kalay klorür reaktif	105

Amonyak	Borat tampon çözeltisi	250	Fenol	Bromat-bromür çözeltisi, potasyum ferrik siyanür çözeltisi, kloroform, 4-aminoantipirinin çözeltisi	120
TKN	Parçalama çözeltisi (Cu)	250	Yağ-gres	n-Hekzan	50
Nitrit-Nitrat	Cd	100	Deterjan	Kloroform	100
Sertlik	EDTA çözeltisi	50	Hidrazin	Hidrazin	25
Klorür	Potasyum kromat indikatör ve gümüş nitrat çözeltisi (Ag, Cr)	100	TOX/AO X	Aktif karbon Klorofenol çözeltileri	25
Ön işlem (Ekstraksiyon)	Silika jel, aseton, hekzan, petrol eteri, diklorometan vs.	100	Tehlikeli maddeler	Stok çözeltileri, asit, baz vs.	1000

Tablo 1’den de görüldüğü gibi konvansiyonel parametrelerden KOİ, sülfat, metaller, toplam fosfor, amonyak/toplam kjeldahl azotu (TKN), sertlik ve klorür deneyi tehlikeli kimyasallar içeren analizlerdir. Konvansiyonel parametreler dışındaki deneyler çoğunlukla özel araştırmalar için yürütülmektedir. Araştırma laboratuvarlarında farklı deneyler yapıldığı zaman tehlikeli madde içerip içermediği göz önünde bulundurulmalıdır.

3.1.2. Diğer Atıklar [Other wastes]

Laboratuvar da kontamine olmuş asitler ve bazlar, kullanım tarihi geçmiş ve tehlike arzeden kimyasallar, yanlış hazırlanan veya standart özelliği değişmiş olan kimyasal çözeltiler, tehlike arzeden kimyasallarla veya biyolojik olarak kontamine olmuş her türlü malzemeler (eldiven, maske, önlük, temizleme bezleri, vb.) bu sınıfta sayılabilir. Ayrıca kimyasal madde ambalajları, atık yağlar, boş basınçlı kaplar, filtreler, aktif karbon ve silika jel gibi tehlikeli madde ile kontamine olmuş atıklar da bu gruba dahil edilebilir [9].

Çevre Mühendisliği bölümü laboratuvarları ve akredite çevre laboratuvarlarında Tablo 1’deki yürütülen parametrelerden ortalama günde 1 tane 2 tekrarlı analiz gerçekleştirildiği kabul edilirse çevre mühendisliği bölümü laboratuvarlarından günde yaklaşık 180 litre ve akredite laboratuvarlarından yaklaşık 960 litre sıvı tehlikeli atık oluşmaktadır. Bu atık miktarı, her bir analizdeki numune miktarını ve kullanım süresi dolmuş tehlikeli stok çözeltileri, asit ve baz gibi kimyasalları kapsamaktadır. Tablo 1’deki miktarlarda ilgili standart metotlara [22] bakılarak

ve analistlere sorularak belirlenmiştir. Bu miktarlar çevre laboratuvarlarından yılda yaklaşık 417000 litre tehlike atık oluştuğu anlamına gelmektedir. Oluşan atık miktarı ve bu atıkların çoğunun kanalizasyon sistemine boşaltıldığı göz önünde bulundurulduğunda arıtma tesislerinin tehlikeli atık bakımından kirlilik yükünün artmasına sebep olarak tesislere zarar verilebileceği ve işletiminin zorlaşacağı aşikârdır.

Doğan vd. [23] yaptıkları çalışmada atık yönetimi için gerekli hedefleri, ihtiyaçları (eğitim, ekonomik vs.) ve yönetmelikleri açıklamışlardır. Bu çalışmada toplam 460 çeşit teorik atık olarak sınıflandırabilecek kimyasal olduğu ifade edilmiştir. Laboratuvar Atık Yönetim Sistemi (LAYS) projesi kapsamında yapılan sınıflandırmaya göre minimum atık depolama kapasitesi 11 olarak belirlenmiştir. LAYS projesinde 5 farklı uygulama alanından (araştırma, çevre analiz, çevre kimyası, enstrümental analiz ve temel işlemler laboratuvarları) yıllık toplam 1058 litre atık oluştuğu açıklanmıştır. Bu hacmin yaklaşık %58’inin araştırma uygulamalarından oluştuğu tespit edilmiştir. Toplam hacmin atık tiplerine göre dağılımında ise %24,2 hidrokarbon, %20,6 asidik, %20,4 tanımsız, %16,9 metal, %8,1 ağır metal, %5,9 klorlu organik, %3,2 krom+civa ve %0,6 alkali olmak üzere 8 ana başlık belirlenmiştir.

Tufts üniversitesinde yapılan bir araştırmada ise, tehlikeli atıkların %75’inin araştırma laboratuvarlarından, %20’sinin eğitim laboratuvarlarından ve geri kalanının ise makinalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir [24].

Lara vd. [25] tarafından Meksika Üniversitesi’ndeki Kimya okulunda gerçekleştirilmiş çalışmada oluşan tehlikeli atıkların büyük bölümünü korozif özelliklere sahip sıvı asidikler ve toksik inorganiklerin oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca, üretilen tehlikeli katı atıkların da büyük kısmını toksik tehlikeli maddelerle kirlenmiş camların oluşturduğu tespit edilmiştir.

3.2. Toplama, Depolama ve Bertaraf [Collection, Storage and Disposal]

3.2.1. Toplama [Collection]

Biyolojik sıvı ve katı atıklar, otoklavlanmaya uygun kaplarda (örneğin otoklav poşeti) toplanmalıdır. İş bitiminde dolması beklenmeden otoklavda sterilize edilmelidir. Kesici-delici atıklar ise üzerinde “biyotehlike” yazısı olan kaplarda biriktirilip sterilize edildikten sonra

atılmalıdır. Sterilizasyon imkanı yoksa 1/10 oranında çamaşır suyu kullanılarak dezenfekte edilmelidir [26]. Biyoteknoloji laboratuvarlarında mikroorganizma tür tayini için elektroforez jellerinde etidyum bromür içeriği $>0,1$ ise tehlikeli atık işaretli sızdırmaz konteynerlerde toplanmalıdır. Etidyum bromür çözeltileri kapalı şişelerde muhafaza edilmeli, çözeltiden ayrılmış halde ise de filtre matrisi bertaraf edilmelidir [9].

Kimyasal atıklar, ya kontamine olmuş ya da kullanım süresi dolmuş kimyasallar ile sıvı atıklardan oluşmaktadır. Sıvı atıklar aşırı sıcak ya da soğuk etkisiyle genişlemeye maruz kalacağından dolayı kaplar tam olarak doldurulmamalıdır. Laboratuvar atıklarının toplanmasında kullanılacak kapların atık çeşidine uygun olmasına dikkat edilmelidir. Sıvı atıklar için kullanılan kap sızdırmaz, kırılmaz ve kapaklı olmalıdır. Kimyasal atıklar için kimyasal etkilere dayanıklı kaplar tercih edilmelidir. Bu kaplar, zamanla meydana gelebilecek reaksiyonlar göz önüne alınarak iyi havalandırılan bir yerde muhafaza edilmelidir. Sıvılar, cam şişede depolanacaksa 5 L; kırılmaz bir kaptaki depolanacaksa da en fazla 10 L hacminde olmalıdır.

Farklı organik çözücü atıklar karıştırılmadan önce, bir tüp içerisinde karıştırılarak zamanla etkileşimi kontrol edilmelidir. Enstrümantal analiz laboratuvarlarında kullanılan kromatografi kolon dolgu maddeleri ve plakaları farklı kaptaki toplanmalıdır. Cihazlarda (vakum pompası, ısıtma banyosu vb.) kullanılan atık yağlar ayrı toplanmalıdır. Bazı kimyasalları içeren atıkların uzun süre depolanmaması gerekebilir. Örneğin, amonyaklı gümüş bileşikler zamanla siyah bir çökeleğin oluşmasına sebep olur. Oluşan bu çökelek patlayıcı olup karıştırılmamalı ve sallanmamalıdır.

Tehlikeli kimyasal atıkların toplandığı kap/konteynerler sızdırmaz olmalı, kapalı tutulmalı (kapların giriş ağzında doldurma hunisi bırakılmamalıdır) ve ikincil bir kap kullanılmalıdır. Etiket üzerindeki bilgiler güncel tutulmalıdır. Ekte Şekil 1A'da atık etiket örneği verilmiştir. Hiçbir koşulda radyoaktif atıklar kimyasal atıklarla karıştırılmamalıdır. Atık kaplarının kapağı kapalı tutulmalıdır. Bunun için kapaklı konteynerler tercih edilmelidir. Bu mümkün olmadığı takdirde de parafilm vb. kullanılarak kapatılmalıdır.

Kırılan camlar temizse sağlam bir kutuda toplanmalı ve geri dönüştürülmelidir. Toplayan

personelin kırık camlardan zarar görmemesi içinde ofisteki veya laboratuvardaki çöp kutusuna bırakılmamalıdır. Şayet kırılan cam kimyasal madde ile kontamine olmuşsa tehlikeli atık olarak değerlendirilip ve yönetilmelidir.

Tehlikeli olmayan inorganik kimyasal maddelerden, sülfatlar, fosfatlar, karbonatlar, oksitler ve boratlar standartlara uygun oranda seyreltilip kanalizasyona verilebilir. Kanalizasyon sistemime deşarj edilmeden önce pH ayarlaması ile nötrleştirme atığın niteliği ve kanalizasyon sistemi açısından faydalı olabilir. Örneğin, organik veya metal bazlı tehlikeli atıklar içermiyorsa bazı asit atıklarının nötrleştirilmesi mümkündür.

Toksik tehlikeli atıklar için kullanılan konteynirler su ile çalkalanmamalı ve tehlikeli atık olarak yönetilmelidir. Diğer konteynirler 3 kez suyla çalkalanarak bertaraf edilmelidir. Özellikleri bilinmeyen atıklar tehlikeli atık olarak değerlendirilmelidir [27].

Atık toplama şemasına göre uygun bir sınıf belirlenemediği takdirde ilgili atık uygun olması şartı ile ayrı bir kaptaki toplanmalı ve gerekli bilgiler yazılmalıdır. Ayrıca, atıkların toplanacağı kap belirlenirken Ekteki Tablo 1A ve 2A'daki bilgilerde göz önünde bulundurulması oluşabilecek riskleri azaltmak/önlemek açısından önemlidir.

3.2.2. Depolama [Storage]







Uyumlu ve uyumsuz kimyasallar/atıklar 4 parametreye göre belirlenebilir:

1. Maddenin Hali: Katı ve sıvı olarak sınıflandırılmalıdır. Atıkların depolanmasında karıştırılmamalıdır. Maddenin haline göre depolamak sızma veya dökülme durumlarında oluşabilecek tehlike riskini azaltır.
2. Kimyasal Yapısı: Kimyasal yapının dikkate alınması aşındırıcı ve oksitleyici kimyasalların depolanmasında önemlidir. Organik ve inorganikler ayrı depolanmalıdır.
3. pH Değeri: $pH < 4$, $pH 4-10$, $pH > 10$ şeklinde 3 grupta incelenebilir.
4. Tehlike Sınıflaması: Kimyasalın güvenlik bilgi formuna (MSDS) bakılarak tehlike sınıfı belirlenebilir. Birden fazla tehlike sınıfına giriyorsa, bu durumda kimyasalın güvenlik bilgi formundaki (MSDS) öne çıkan tehlike sınıfına dahil edilir.

Şekil 2’de verilen kimyasal depolama matrisi atıklar içinde uygulanabilir.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+
2	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
3	-	+	+	+	-	-	+	-	+	+
4	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
6	+	+	-	-	+	+	-	+	+	+
7	+	+	+	-	+	-	+	+	+	+
8	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
9	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
10	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+

Şekil 2. Kimyasalların/Atıkların Depolanma Matrisi [Matrix of Storage of Chemicals/Waste] [20]

( alevlenir sıvılar ve aerosoller (Sınıf 3);  alevlenir katılar ve kendiliğinden tepkimeye giren maddeler (Sınıf 4.1);  kendiliğinden yanmaya yatkın maddeler (sınıf 4.2);  su ile temas ettiğinde alevlenir gazlar çıkaran maddeler (Sınıf 4.3);  birlikte depolanabilir;  birlikte depolanamaz)

Geçici depolama için kullanılan alanda bulunması/yapılması gerekenler girişte tehlike uyarı işaretinin bulunması ve kilitli, sızdırmaz zemin, uygun havalandırma, yangın önlemi vb. gibi güvenlik önlemlerinin alınmasıdır. Maksimum 200 litre geçici depolanmalı ve en fazla 12 ay depolanmalıdır. Sızmalara karşı konteynırlar haftalık olarak kontrol edilmelidir [27]. Düşme riskinden dolayı tehlikeli atık içeren cam şişeler, kuvvetli asit ve bazlar içeren atıklar zemine yakın seviyedeki raflarda tutulmalıdır. Ayrıca, planlı yönetimi sağlamak için toplanan atıklar kayıt altına alınmalıdır. Ekteki Tablo 3A’da atık kayıt defteri örneği verilmiştir.

3.2.3. Bertaraf [Disposal]

Atık yönetimi, atık oluşumunu önleme, kaynaktan azaltma, sınıflandırma ve ayırma, yeniden kullanma, geri kazanma, bertaraf etme ve bu işlemler sonrası izleme, kontrol ve denetleme aşamalarından oluşmaktadır [28]. Çevre laboratuvarlarında oluşan atıkların bertarafında 2872 sayılı Çevre Kanunu ve 4856 sayılı Çevre ve Şehircilik Bakanlığı kapsamındaki “Atık Yönetimi Yönetmeliği”, “Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği”, “Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü

Yönetmeliği”, “Atıkların Alternatif veya Ek Yakıt Olarak Kullanılması Hakkında Tebliği”, ve “Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği” dikkate alınmalıdır [19, 21, 28, 29, 30]. Atık hiyerarşisi Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Atık hiyerarşisi [Waste hierarchy]

Laboratuvar atık yönetimindeki en iyi strateji maksimum güvenliği sağlamak ve çevresel etkileri azaltmak için satın alma sürecinde bu amaçları dikkate almaktır. Bunun için laboratuvar personeli, kimyasalların fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyi bilmelidir. Atığın tehlike seviyesinin belirlenmesi, doğru atık sınıflandırması, ve uygun yönetim, minimizasyon ve bertaraf stratejilerinin belirlenmesi laboratuvar personelinin sorumluluğundadır.

Atık minimizasyon metotları kaynağında azaltma, geri dönüşüm ve geri kazanımdan oluşur [22]. Bu yöntemler yeşil kimyanın prensiplerini içerirler. Kaynağında azaltma, laboratuvar atık yönetimindeki en iyi yaklaşım olup, atık üretimi/oluşumu tehlikeli kimyasal kullanan metotların yerine mümkünse tehlike içeriği az olan/içermeyen metotlar tercih edilerek ve mikro ölçekli analitik metotlar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ayrıca, kimyasalların daha az miktarlarda kullanılması ve satın alınması ile sağlanabilir. Kimyasal envanteri tutularak fazladan satın almalar önlenir [31]. Büyük hacimli/miktarlı alımlar düşük maliyetli görülebilir fakat kullanım süresi biten kimyasalların bertaraf maliyeti de dikkate alınmalıdır. Açılmamış kimyasallar tedarikçilere geri verilerek bertarafı sağlanabilir. Oluşabilecek riskleri azaltmak/iş sağlığı ve güvenliğini sağlamanın yanısıra geri dönüşümü ve geri kazanımı kolaylaştırmak için atıklar ayrı toplanmalıdır. Ancak su ve atık su laboratuvar atıklarının geri dönüşümü üretilen hacimlerden dolayı sınırlı potansiyele sahiptir.

Çevre laboratuvarlarında oluşan kırık temiz cam malzemeler, elektronik atıklar, atık yağlar,

plastikler, piller ve demir, çelik, bakır, alümiyum ve kurşun içeriğine sahip atıklar geri dönüştürülmelidir [26]. Civa içeren malzemeler (termometreler, termostat anahtarları, manometreler vb.), kurşun içeren malzemeler, bataryalar, florsan lamba tüplerinin geri dönüşümü de yapılmalıdır. Çözücü atıkların çoğu çimento üretim tesislerinde yakıt olarak kullanılabilir [27]. Halojeniz solventlerin yakıtta karışması daha uygun olduğundan halojenli ve halojeniz solventlerin ayrı toplanmasına dikkat edilmelidir. [31].

Arıtım, hacmi azaltmak, hareketliliği/taşınırlılığını arttırmak ve toksikliği azaltmak için kullanılabilir. Tehlikeli kimyasalların toplanması ve taşınması işlemleri sırasında insan ve çevre sağlığında oluşabilecek potansiyel zararlar, bazı kimyasal işlemlerle en aza indirilmelidir/yok edilmelidir. Laboratuvarlarda fiziksel arıtım yöntemleri hacim ve taşınırlılığı azaltmak için genellikle kullanılır. Arıtma işlemleri solidifikasyon, distilasyon, flokülasyon, sedimentasyon, flotasyon, havalandırma, filtrasyon, santrifüj, adsorpsiyon, ultrafiltrasyon vs. metotları ile yapılabilir [22]. Örneğin, atık organik çözücüler distile edilerek tekrar kullanılabilir [8]. Kimyasal arıtım yöntemleri arasında en yaygını nötralizasyon olup oksidasyon/redüksiyon, iyon değişimi, koagülasyon, çöktürme, kimyasal fiksasyon vb. kullanılabilir. Örneğin ağır metal içeren atık çözeltiler uygun bir reaktifle çöktürülebilir. Tehlikeli içeriğe sahip olmayan asit ve bazlar nötralizasyon işleminden sonra kanalizasyona verilebilir [8]. Nötralizasyon işlemi tecrübeli personel tarafından az atık ile yeterli büyüklükteki kaplarda gerçekleştirilmelidir [26]. Klorlu hidrokarbonlar, siyanürler, ağır metaller, korozyon (pH<5, pH>11.5), organik solventler, yağ ve gres, etidyum bromür hiçbir şekilde kanalizasyona verilmemelidir [32].

Tehlikeli atıklar üretiminden nihai bertarafına kadar çevre ile uyumlu yönetilmelidir. Örneğin üretimi azaltılmalı, zararı en aza indirilmeli, mümkünse geri kazanım uygulanmalı, uygun şekilde depolanmalı ve bertaraf edilmelidir [31].

2014 TUİK [33] verilerine göre atık bertaraf ve geri kazanım tesis sayıları Tablo 2’te verilmiştir.

Tablo 2. Türkiye’deki atık bertaraf ve geri kazanım bilgileri (Waste disposal and recycling information in Turkey) [33]

2014 yılı	Tesis Sayısı	Atık Miktarı, ton/yıl
Bertaraf	117	41324637

Düzenli Depolama	113	41281755
Yakma	4	42882
Geri Kazanım	868	19724241
Kompost	4	94019
Berber Yakma	39	532343
Diğer Geri Kazanım	825	19097879

Literatürdeki son verilere göre ise Türkiye’de tehlikeli atık bertaraf ve geri kazanım tesisleri toplam 245 tir. 201 tanesi tehlikeli atık geri dönüşüm tesisi, 36 tanesi yakma ve birlikte yakma tesisi ve 8 tanesi de atık gömme tesisidir

Yakma tesislerinden ikisi İZAYDAŞ ve PETKİM’dir. 1. Sınıf düzenli depolama tesisleri ise İstanbul, İzmir, Tekirdağ, Kocaeli, Ankara, Manisa Kütahya ve Adana’dır [34].

Laboratuvarlarda oluşan tehlikeli atıklar ve sterilize edilmiş biyolojik atıklar bertaraf etmek için İZAYDAŞ ve PETKİM firmalarına gönderilebilir. 1996 da İzmit’te kurulan İZAYDAŞ, 1997’den beri atık almaktadır. İZAYDAŞ 35000 ton/yıl kapasitesinde olup Türkiye’nin tüm illerinden atık kabul eden ilk öncü firmadır. Tesise çürütme ile metan gazı eldesi için evsel atıkları, yakma ile bertaraf etmek için tehlikeli atıkları, sterilizasyon etmek için tıbbi/biyolojik atıkları ve biyogaz elde etmek için mezbaha atıklarını kabul etmektedir. Bu bertaraf yöntemleri sonucu oluşan atıklar ise tesis bünyesindeki düzenli depolama sahalarına gömülmektedir. Fakat geri dönüşebilen, radyasyonlu, patlayıcı, dışkı ve kadvraları kabul etmemektedir. PETKİM ise 1965 yılında İzmir’de kurulan bir tesistir. Tesis kapasitesi 17500 ton/yıl olup atıkları bertaraf etmek için sadece yakma tesisine sahiptir. Bazı sanayilerden kaynaklanan atıkları ve listede belirtilmeyen atıkları (laboratuvar kimyasalları), atık yönetim tesislerinden kaynaklanan atıkları (iyon değiştirici reçineler, aktif karbon, krom-siyanür giderme, nötralizasyon atıkları vb.), ayrı toplanmış fraksiyonlar dahil belediye atıklarını (evsel, ticari, endüstriyel ve kurumsal) kabul etmektedir.

Biyolojik atıklardan yanabilir malzemeler özel önlemlerle yakılır, alternatif metot yoksa sterilizasyondan sonra depolanır [22].

Atık piller, Taşınabilir Pil Üreticileri ve İthalatçıları Derneği (TAP) tarafından toplanmaktadır. TAP, 2004 yılında kurulmuştur. Eczane, Ulusal Market Zinciri ve Araç Muayene İstasyonu’nda toplanmaktadır. Elektrikli atıklar,

atık getirme merkezlerine, üreticilere ve lisanslı işleme tesislerine verilebilir.

Daha fazla arıtılmayan ve tehlikeli olmayan atıklar suya, atmosfere deşarj edilebilir. Laboratuvar atıklarının sınırlı miktarları kanalizasyon sistemine verilebilir veya çeker ocağında kimyasalların buharlaştırılması yapılabilir [22].

4. SONUÇ [CONCLUSION]

Çevre laboratuvarlarında birçok tehlikeli kimyasal içeren deneyler yürütülmektedir. Yaklaşık yapılan hesap sonucunda da büyük oranda sıvı fazda tehlikeli atık içeren atıklar/çözeltiler oluştuğu gözlenmiştir. Bu yüzden, çevre laboratuvarlarında atık yönetimi oluşturmak için yöneticilere büyük sorumluluk düşmektedir. Yöneticiler atık yönetimi sağlamak için laboratuvar sorumlularını belirlemelidir, laboratuvardaki çalışanları bilgilendirmek amacı ile eğitimler verdirmelidir ve atık toplama, depolama için uygun istasyonları kurmak ve toplanan atıkların bertarafı için ilgili firmalarla anlaşmalardan sorumlu olmalıdır. Laboratuvardan sorumlu kişiler laboratuvarında çalışanlara eğitim vermek, geçici depolama alanı için gerekli malzemeleri (bidon, şişe, tepsi vs.) temin etmek, kayıt defteri tutmak, denetlemek ve yöneticilere bilgi vermekle sorumlu tutulmalıdır.

Çevre laboratuvarlarındaki tehlikeli atığın miktarını ve derecesini azaltmak için başlıca yapılacaklar mikro ölçekli analizleri, tehlikesiz madde içeren yöntemleri seçmek, kimyasal envanteri tutmak ve gerektiği kadar kimyasal satın almaktır.

Sonuç olarak, çevre laboratuvarlarında gerçekleştirilecek planlı atık yönetimi çalışanların çevreye duyarlılığını artırarak atık su arıtma tesislerinin kirlilik yükünü büyük oranda azaltacaktır.

EKLER

1. Kimyasallar Hakkında Bazı Bilgiler [Some information about chemicals]

Atık toplama şemasına göre uygun bir sınıf belirlenemezse, ilgili atık başka bir kaptan toplanmalı ve gerekli bilgiler etikete yazılmalıdır. Ayrıca, atıkların toplanacağı kap belirlenirken aşağıdaki Tablo 1A ve Tablo 2A'daki bilgileri göz önünde bulundurulması oluşabilecek riskleri azaltmak/önlemek açısından önemlidir.

Tablo 1A. Birbiri ile karışmaması gereken kimyasallar [Chemicals that should not interfere with each other] [8]

Kimyasal	Karışmaması Gerekenler	Kimyasal	Karışmaması Gerekenler
Aktif karbon	Kalsiyum hipoklorit, oksitleyici maddeler	İyot	Asetilen, amonyak, hidrojen
Alkali metaller	Su, karbondioksit, halojenli alkanlar, karbondioksit, halojenler	Kalsiyum oksit	Su
Amonyak	Cıva (örneğin manometre içerisinde), klor, iyot, brom, kalsiyum hipoklorit, hidroflorik asit	Klor	Amonyak, asetilen, bütan ve diğer petrol gazları, turpentin
Amonyum nitrat	Toz halinde metaller, yanıcı sıvılar, kükürt, kloratlar, tüm asitler, nitritler, kükürt, ince taneçikli organik veya yanıcı başka maddeler	Kloratlar	Amonyum tuzları, asitler, metal tozlar, sülfür, ince taneçikli organik veya yanıcı maddeler
Anilin	Hidrojen peroksit, nitrik asit	Kromik asit ve krom	Asetik asit, naftalin, kamfer, gliserin, bazı alkoller, yanıcı sıvılar, petrol benzini
Asetik asit	Kromik asit, nitrik asit, hidroksilli bileşikler, etilen glkol, perklorik asit, peroksitler, permanganatlar	Kükürtlü hidrojen	Nitrik asit, oksidan gazlar
Asetilen	Flor, klor, brom, bakır, cıva, gümüş	Nitratlar	Sülfürik asit
Aseton	Derişik nitrik asit, derişik sülfürik asit	Nitrik asit	Asetik asit, anilin, kromik asit, hidrosiyamik asit, hidrojen sülfid, yanıcı sıvılar ve gazlar, bakır, ağır metaller
Azid	Asitler	Oksijen	Yağlar, gres, hidrojen, yanıcı sıvılar, yanıcı katılar ve yanıcı gazlar
Bakır Brom	Asetilen, hidrojen peroksit	Okzalik asit	Gümüş, cıva
Cıva Flor	Amonyak, asetilen, bütan ve diğer petrol gazları, turpentin, benzen	Perklorik asit	Asetik anhidrit, bismut ve bileşikleri, alkol, kağıt, tahta, yağ
Fosfor (beyaz)	Asetilen, amonyak, fulminik asit	Peroksitler	Asitler
Gümüş	Bütün maddeler	Potasyum	Karbon tetraklorür, karbondioksit, su
Hidroflorik asit	Hava, oksijen, indirgen maddeler, alkaliler	Potasyum permanganat	Gliserin, etilen glkol, benzaldehit, sülfürik asit
Hidrojen peroksit	Asetilen, okzalik asit, tartarik asit, amonyum bileşikleri, fulminik asit	Selenitler	İndirgen maddeler
Hidrojen sülfid	Amonyak	Sodyum peroksit	Etil ve metil alkol, glasiyal asetik asit, asetik anhidrit, benzaldehit, karbon disülfür, gliserin, etilen glkol, etilen asetat, metil asetat, furfural
Hidrokarbonlar	Bakır, krom, demir, metal ve metal tuzları, yanıcı sıvılar, anilin, nitrometan, alkol, aseton, organik bileşikler	Sodyum nitrit	Amonyum nitrat, diğer amonyum tuzları
Hidroksiyamik asit	Nitrik asit, yükseltgen maddeler	Sülfürik asit	Kloratlar, perkloratlar, permanganatlar
	Flor, klor, brom, kromik asit, sodyum peroksit	Yanıcı sıvılar	Amonyum nitrat, kromik asit, hidrojen peroksit, nitrik asit, halojenler, sodyum peroksit, diğer yükseltgen maddeler

HNO₃, organiklerle reaksiyon verir. Peroksitler (H₂O₂)ve perklorik asit (HCl) organik ve metallerle reaksiyona girer. Hidroflorik asit ise cam konteynırları çözeceği unutulmamalıdır.

Tablo 2A. Tehlikeli kimyasallar [Hazardous chemicals] [8]

Tutuşabilen Atıklar	Reaktif Atıklar	Oksitleyici Atıklar
Aseton	Asetilen	
Etil Eter	Hidrojen	
Sodyum	Nitro bileşikleri	
Hidrojen	Amonyak	Peroksitler
Etilalkol	Organik peroksitler	
Asetik asit	Perkloratlar	
Hegzan	Bromatlar	
Asetilen		
Asitler ve oksitleyicilerden ayrı depolanmalı!!!	Oksitleyicilerden ayrı depolanmalı!!!	Tutuşabilen atıklardan ayrı depolanmalı!!!
Korozif Atıklar	Toksik Atıklar	Mutajen Atıklar
Sülfürik asit	Formaldehid	
Hidroklorik asit	Dimetilaminobenzen	Etidyum bromür
Nitrik asit	Nitrobifenil	Formol
Sodyum hidroksit	Asbest	Bazik fuksin
Sitrik asit	Metil hidrazin	EDTA
Potasyum hidroksit	Potasyum siyanür	Potasyum dikromat
Amonyum hidroksit		

Asit ve bazlar ayrımı
yapılmalı ve organiklerden
ayrı depolanmalı!!!

Kanserojen Atıklar	Teratojen Atıklar	Ekotoksik Atıklar
Benzen	Kurşun	Nessler reaktifi
Arsenik	Etilen oksit	Potasyum siyanür
Formaldehid	Formaldehid	Gümüş siyanür
Vinil klorür	Etilen dibromür	

2. Atık Etiket ve Kayıt Defteri Örneği [Waste label and registry examples]

DİKKAT TEHLİKELİ ATIK		
Birim Adı:		
Sorumlu Kişi:	Telefon:	
Adres:	Başlama Tarihi:	
Dolum Tarihi:		
Atık Miktarı ve Açıklamaları		
Atık İçeriği:	% Derişim ya da ppm (mg/L):	
Fiziksel Özellik (Oda şartlarındaki):		
Katı/Sıvı/Gaz:	Renk:	
pH:	Ağırlık:	
Ambalaj türü:	Hacim:	
Diğer:		
Atık Kodu:		
H Kodu:		
H1	H4	H8
	H12	
H2	H5	H9
	H13	
H3 A	H6	H10
	H14	
H3 B	H7	H11
	H15	
Açıklamalar:		
Atık ve H kodu "Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği"ne göre yapılacaktır.		

Şekil 1A. Laboratuvarda kullanılabilir atık etiketi [Waste label that can be used in the lab]

Atık toplama kuralları göz önüne alınarak belirlenen atık kaplarına 'Atık Etiketi' yapıştırılmalıdır. Atık etiketi, sorumlu kişi/kurumun bilgileri, kap içerisindeki kimyasallar hakkında bilgileri ve tehlike kategori vb. bilgileri içermelidir. Atık etiketi örneği Şekil 1A'da verilmiştir.

Tablo 3A'da ise atık kayıt defter örneği bulunmaktadır.



Tablo 3A. Atık kayıt defteri örneği [Waste registry example]

Atığı n Adı	Atık Türü ve Miktar	Tehlik e Smfi	Lab No/Ad ı	Ön İşlem/p H	Tesli m Eden	Tari h	İmz a

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Çevre Mühendisliği, [Çevrimiçi]. Available: <https://tr.wikipedia.org/>
- [2] A. Samsunlu, "Çevre Mühendisliği Eğitimi", *Türkiye'de Çevre Kirlenmesi Öncelikleri Sempozyumu I*. Boğaziçi Üniversitesi. İstanbul, 284-302, 1991.
- [3] İ.A. Şengil, ve M. Yurtsever, "Türkiye'deki Çevre Mühendisliği Bölümlerinde Öğretim Üyesi Profili", *2. Çevre Mühendisliği Eğitimi ve Meslek Alanındaki Gelişmeler Çalıştayı*, Antalya, 127-145, 2011, [Çevrimiçi]. Available: http://www.cmo.org.tr/resimler/ekler/2f92a32d9399be6_ek.pdf.
- [4] Türk Akreditasyon Kurumu (TURKAK), [Çevrimiçi]. Available: <https://secure.turkak.org.tr/kapsam/search>
- [5] Y. Geng, K. Liu, B. Xue, T. Fujita, "Creating a "green university" in China: A case of Shenyang University", *Journal of Cleaner Production*, 61: 13-19, 2013.
- [6] T. Korenaga, H. Tsukube, S. Shinoda, I. Nakamura, "Hazardous Waste Control in Research and Education", Lewis Publisher, USA, 1994.
- [7] C. Armijo de Vega, S. Ojeda-Benítez, & M.E. Ramírez-Barreto, "Mexican educational institutions and waste management programmes: A University case study", *Resour. Conserv. Recy.* 39(3), 283–296, 2003.
- [8] Entegre Atık Yönetimi, Ege Üniversitesi, 2011, [Çevrimiçi]. Available: <http://euatik.ege.edu.tr/>
- [9] Atık Yönetimi El Kitabı, Anadolu Üniveristesi, 2012, [Çevrimiçi]. Available: <https://ays.anadolu.edu.tr/node/64>,
- [10] Kimyasal Hijyen Planı, Kimya-Metalurji Fakültesi, İTÜ, 2003, [Çevrimiçi]. Available: http://www.kimyamuhendisligi.itu.edu.tr/bolum/Kimyasal_Hijyen_Planı.pdf
- [11] Kimyasal Hijyen Planı, Kimya Mühendisliği Bölümü, İYTE, (2007), [Çevrimiçi]. Available: <http://www.iyte.edu.tr/cheweb/tur/indextr.htm>
- [12] A.S. Allen, "Greening the campus", *Environ. Sci. Technol.*, 35(9), 198A–202A, 1999.
- [13] K.B. Liu, et al., "Project Report on Waste Separation at Shenyang University", Work paper. Shenyang University (in Chinese), 2012.
- [14] S. Danteravanich, J. Kaewborisut, C. Siri Wong, U. Peutpaiboon, "Laboratory Waste Management at Prince of Songkla University, Thailand", *Proceeding in the R'2000 5th World Congress on Integrated Resources Management*, Toronto, Canada, 2000.

- [15] Laboratory Waste Minimization and Pollution Prevention, [Online], <http://www.p2pays.org/ref%5C01%5Ctext%5C00779/ch15.htm>
- [16] D.P. Smyth, A. L.Fredeen, & A. L. Booth, “Reducing solid waste in higher education: The first step towards “greening” a university campus. *Resour. Conserv. Recy.* 54 (11), 1007–1016, 2010.
- [17] S. Taghizadeh, et al., “Solid waste characterization and management within university campuses case study: University of Tabriz”, *Elixir Pollution.* 43, 6650–6654, 2012.
- [18] J. O. Okeniyi, & E. U. Anwan, “Solid wastes generation in Covenant university. Ota. Nigeria: Characterisation and implication for sustainable waste management”, *J. Mat. Env. Sci.* 3(2), 419–425, 2012.
- [19] Tehlikeli Maddelerin Su ve Çevresinde Neden Olduğu Kirliliğin Kontrolü Yönetmeliği, Resmi Gazete, [Çevrimiçi]. Available: <http://www.resmigazete.gov.tr/>.
- [20] Laboratuvar Güvenliği, [Çevrimiçi]. Available: <http://www.laboratuvarguvenligi.com>.
- [21] Tehlikeli Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Resmi Gazete, [Çevrimiçi]. Available: <http://www.resmigazete.gov.tr/>.
- [22] APHA; AWWA; WEF., Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22. Ed., APHA Publication, Washington D.C., 2012.
- [23] E. Doğan, K. Gedik, D. Kaya, A. M. Kocabaş, U.G. Özkan-Yücel, Ö. Yılmaz, Y. D. Yılmazel ve G. N. Demirer, “The Laboratory Waste Management Implementation in the Department of Environmental Engineering at the Middle East Technical University”, *Environmental Problems Symposium: Kocaeli*, 14-17 May 2008, Kocaeli University, Kocaeli, Turkey.
- [24] EPA, Report to Congress: Management of Hazardous Wastes from Educational Institutions (1989), [Online]. Available: <https://www.epa.gov/hwgenerators/1989-report-congress-management-hazardous-wastes-educational-institutions>.
- [25] E.R. Lara, J. R. De la Rosa, A.I.R. Castillo, F. Cerino-Cordova, U.J.L. Chuken, Delgadillo, S.S.F., P. Rivas-Garcia, “A Comprehensive Hazardous Waste Management Program in a Chemistry School at a Mexican University”, *Journal of Cleaner Production*, 142: 1486-1491, 2017.
- [26] Kimyasalların Güvenli Depolanması, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü, İş Sağlığı ve Güvenliği Merkezi Müdürlüğü, 2011, [Çevrimiçi], http://www.isgum.gov.tr/rsm/file/isgdoc/IG7-kimyasal_depolama_rehberi.pdf.
- [27] Laboratory Chemical Waste Management Guidelines, Environmental Health and Radiation Safety, Penislavya University (2011), [Online]. Available: http://www.ehrs.upenn.edu/media_files/docs/pdf/wastesectionupdatefinal.pdf.
- [28] Atık Yönetimi Yönetmeliği, Resmi Gazete, [Çevrimiçi], Available: <http://www.resmigazete.gov.tr/>
- [29] Atıkların Ek Yakıt Olarak Kullanılmasında Uyulacak Genel Kurallar Hakkında Tebliğ, [Çevrimiçi]. Available: <http://www.cygm.gov.tr/cygm/>.
- [30] Tıbbi Atıkların Kontrolü Yönetmeliği, Resmi Gazete, [Çevrimiçi]. Available: <http://www.resmigazete.gov.tr/>.
- [31] The Committee on Prudent Practices in the Laboratory, Prudent Practices in the Laboratory: Handling and Management of Chemical Hazards, *National Academy Press Washington*, D.C., 2011, 360 pp [Online]. Available: <http://web.uconn.edu/ehs/Chemical/Prudent%20Practices%20in%20the%20Laboratory.pdf>
- [32] Laboratory Waste Disposal, Chemistry School, Wollongog University, 2010, [Online]. Available: <https://smah.uow.edu.au/content/groups/public/@web/@sci/@chem/documents/doc/uow016883.pdf>
- [33] TUIK, 2014. Türkiye İstatistik Kurumu, <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18776>.
- [34] E. Ateş, “Türkiye’deki Tehlikeli Atık Yönetim Sisteminin Değerlendirilmesi”, Çevre Mühendisliği Bölümü, Hacettepe Üniversitesi, 2017.

	Sakarya University Journal of Science SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	Geliş/Received 25-01-2017 Kabul/Accepted 28-11-2017	Doi 10.16984/saufenbilder.287861	

Asidik ve basık pomza içeren polipropilen kompozitlerinin mekanik, fiziksel ve morfolojik özellikleri

Ümit Tayfun^{*1}, Yasin Kanbur²

ÖZ

Asidik pomza (AP) ve bazık pomza (BP), polipropilene (PP) eklenmeden önce silan bağlayıcı kullanılarak polimer matris ile uyumlu hale getirilmiştir. Bunun yanı sıra, maleik anhidrit aşılansız PP (MA-g-PP) ile kompozitler hazırlanmıştır. Kompozitler, büyük ölçekli üretime en uygun yöntem olan eriyik karıştırma metodu ile laboratuvar ölçekli çift vidalı ekstruder kullanılarak üretilmiştir. Karıştırıcıdan çip formunda elde edilen PP kompozitler, enjeksiyonlu kalıplama tekniği ile şekillendirilmiştir. Hazırlanan kompozit numunelerinin mekanik dayanımları başta olmak üzere su emme testi ile dış hava şartlarında kullanımları incelenmiştir. Kompozitlere sırasıyla çekme testi, dinamik mekanik analiz (DMA) ve eriyik akış indisi testleri uygulanmıştır. Ayrıca pomza parçacıklarının polipropilen matris içinde dağılımını gözlemlemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) mikrografikleri incelenmiştir. Silan ile modifiye edilmiş asidik pomza, bazık pomza ve MA-g-PP ile hazırlanan kompozitlerin mekanik özelliklerinde iyileşmeler saptanmıştır. SEM mikrografikleri incelendiğinde; silanlanmış pomza içeren ve MA-g-PP matrisli kompozitlerde, pomza parçacıklarının polimer yüzeyleri ile uyumlu hale geldiğinden PP matris içerisinde iyi dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle asidik pomza içeren kompozitlerin erime akış değerlerinde, PP ile kıyaslandığında belirgin bir değişim olmamıştır. Bu sonuç, büyük ölçekteki uygulamalarda pomzanın dolgu maddesi olarak eklenmesiyle polipropilenin işlenmesinde önemli bir sorunla karşılaşmayacağı çıkarımını desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Polipropilen, Pomza, Yüzey Modifikasyonu, Kompozit Malzemeler

Mechanical, physical and morphological properties of acidic and basic pumice containing polypropylene composites

ABSTRACT

Acidic pumice (AP) and basic pumice (BP) were compatibilised with the polymer matrix by using silane coupling agents before their addition into polypropylene (PP). In addition, composites with maleic anhydride grafted polypropylene (Ma-g-PP) were prepared. Composites were prepared by melt-blending method using lab-scale twin screw extruder which is the most suitable method for the large scale production.

* Corresponding Author

PP composites that obtained as chip form from the mixer were shaped with injection molding. Additionally to the mechanical properties of prepared composites, water absorption test of the composites were performed in order to investigate their outdoor usage conditions. Tensile test, dynamic mechanical analysis (DMA) and melt flow index tests were applied to composites, respectively. Furthermore, scanning electron microscopy (SEM) micrographs were examined for observation of the dispersion of pumice particles into polypropylene matrix. Improvements in mechanical properties of composites were obtained by using silane-modified acidic pumice, basic pumice and MA-g-PP. According to SEM micrographs, composites which contain silanized pumice and MA-g-PP exhibit better dispersion of pumice particles into PP matrix due to compatibilization of particles with polymer surfaces. There were no remarkable changes observed for the melt flow values of especially acidic pumice containing composites as compared with PP. This results support the conclusion that the addition of pumice caused no obvious problem for the processibility of polypropylene in large scale applications.

Keywords: Polypropylene, Pumice, Surface Modification, Composite Materials

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimer kompozitler otomotiv endüstrisinden ambalaj sektörüne kadar çeşitli uygulamalarda kendine yer bulmuştur. Bu malzemelerin hafif ve pratik uygulamaya sahip olması, araştırmacıları kompozitlerin öncelikli olarak mekanik dayanımlarını artırma konusuna yöneltmektedir. Polipropilen, ülkemizde üretimi gerçekleştirilen ve birçok alanda endüstriyel kullanımı giderek artmakta olan önemli mühendislik polimerlerinden biridir [1]. Dolgu malzemelerinin polimer matris içerisinde daha iyi dağılım göstererek iyi mekanik özellikler sağlanması kullanılan dolgunun ve polimer yüzeylerinin birbirlerine uyumlu olması ile gerçekleştirilebilir. Yüzeyler uyumlu olmaması durumunda dolgu malzemesi topaklanarak istenilen özellikler sağlanamaz. Polimer matris ile dolgu malzemesinin yüzeylerinin birbirlerine uyumlu hale getirilmesi farklı metotlarla sağlanabilir, bu metotlar arasında dolgu malzemesinin yüzeyinin modifiye edilmesi, uyumlaştırıcı katkı malzemelerinin kullanılması ve Ma-g-PP gibi uyumlaştırıcı fonksiyonel gruplar içeren polimer matrislerin kullanımı sayılabilir [2,3].

Türkiye, dünyadaki pomza rezervi göz önünde bulundurulduğunda oldukça yüksek bir paya sahiptir. Ülkemizde pomza yatakları, şu ana kadar yapılmış araştırmalarda belirtildiği kadarıyla doğu anadolu ve iç anadolu bölgelerinde bulunmaktadır. Bitlis, Nevşehir ve Kayseri pomza açısından başlıca zengin bölgelerdir. Bu bölgelerde asidik ve bazik pomza olmak üzere iki tip oluşumu mevcuttur. Kimyasal bileşim açısından iki tip

farklılık göstermekte olup bazik pomza, asidik pomza ile kıyaslandığında yapısında daha yüksek oranda metal oksitleri içermektedir [3-6]. Pomza tozu, inşaat sektörü başta olmak üzere tekstil, tarım ve kozmetik gibi alanlarda çeşitli uygulamalarda gerek hammadde gerekse katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [7]. Pomza tozu, literatürde polietilen [8], poli (vinil alkol) (PVA) [9], poli(vinil pirrolidon) (PVP) [10], poli(anilin)(PAn) [11,12], poli(hidroksietilmetakrilat) [13] ve poli(fenilen sülfid) (PPS) [14] gibi birçok polimerde kullanılmıştır.

Bu çalışmanın amacı, bir çok sektörde ihtiyaç duyulan kompozit malzeme uygulamalarında kullanım potansiyeli olan, mevcut kaynaklarımızdan pomza tozunun polimerik kompozitlerde etkin ve pratik şekilde uygulanmasına katkı sağlamaktır. Bu doğrultuda, asidik ve bazik formdaki pomza tozları yüzey modifikasyonu işlemine tabii tutularak PP matrisi içerisinde eriyik karıştırma yöntemi ile karıştırılmış ve kompozitler oluşturulmuştur. Yüzey işlemlerinin karakterizasyonu, SEM/EDX kullanılarak yapılmıştır. Hazırlanan kompozitlere çekme dayanım, dinamik mekanik analiz (DMA) ve eriyik akış indisi (MFI) testleri uygulanarak malzemelerin mekanik, termo-mekanik ve akış özellikleri incelenmiştir. Bunun yanısıra, su emme testi sonrası kompozitlerin dış hava şartlarındaki su tutma kapasiteleri ve mekanik özelliklerindeki değişimler tartışılmıştır. Yüzey modifikasyonu uygulanan ve uygulanmayan pomza parçacıklarının PP matrisine yapışması ve matris içindeki dağılımları, tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) mikrografikleri incelenerek kıyaslanmıştır.

2. MALZEMELER VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHOD)

2.1. Kullanılan Malzemeler (Materials Used)

Polipropilen (BP 335 SA), Borealis firmasından, anhidrit aşılantı polipropilen (1015 Exxelor PO) ise ExxonMobil firmasından temin edilmiştir. Asidik pomza ve bazik pomza Miner Madencilik (Nevşehir) firmasından, silan uyumlaştırıcı olarak kullanılan amino propil trietoksi silan (APTES) ve modifikasyon işleminde çözücü olarak kullanılan etanol ise Merck firmasından tedarik edilmiştir.

2.2. Kompozitlerin Hazırlanması ve Yapılan Testler (Preparation of the Composites and Applied Tests)

Kompozitler, DSM Xplore çift vidalı laboratuvar ölçekli mikro-karıştırıcıda 5 dakika boyunca 100 rpm hızında ve 200 °C sıcaklıkta karıştırılarak hazırlanmıştır. Kompozitler ağırlıkça sabit % 10 asidik pomza veya bazik pomza dolgu maddesi içermektedir. Silanlama işlemi sırasında asidik pomza ve bazik pomza tozları oda sıcaklığında % 2 APTES/etanol çözeltisi içerisinde 2 saat karıştırılmıştır ve daha sonra tozlar etanol ile birkaç defa yıkanarak 100 °C'de 12 saat süresince kurutulmuştur.

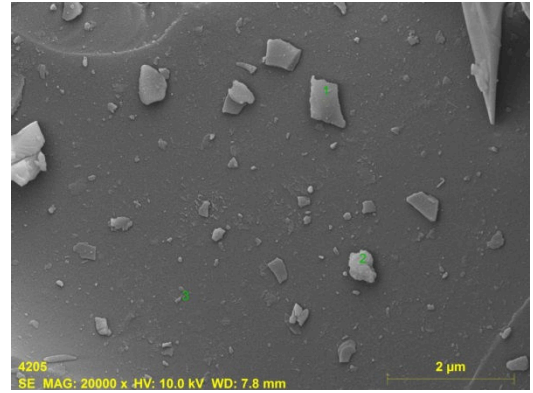
Çekme testi numunelerinin hazırlanmasında DACA Instrument enjeksiyonlu kalıplama cihazı kullanılmıştır. Enjeksiyonlu kalıplama için 210 °C'lik kovanda eritilen plastik, soğuk kalıba 8 bar'lık bir basınçla basılarak çekme testi numuneleri hazırlanmıştır.

Çekme testleri, Lloyd marka cihaz kullanılarak 5 cm/dk çekme hızında ASTM D-638 standartları baz alınarak yapılmıştır. Su emme testleri, ASTM D-570 standardına uygun olacak şekilde, numunelerin 15 gün su içerisinde bekletilmesinden sonra yapılmıştır. Kompozitlerin erime akış indisi testleri 200 °C'de ve 2,16 kg sabit yük kullanılarak yapılmıştır. Dinamik mekanik analiz (DMA) ölçümleri, Perkin Elmer DMA 8000 cihazı kullanılarak -50 °C ile 150 °C sıcaklık aralığında, 1 Hz sabit frekansta ve 10 °C/dak hızında, bükme modu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

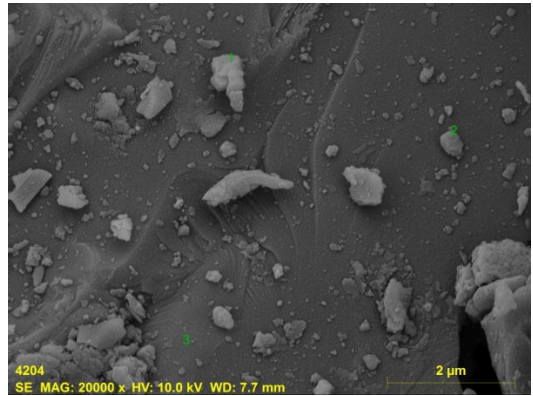
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Pomzanın Yüzey Modifikasyonu (Surface Modification of Pumice)

SEM-EDX analizi ile silanlanmış asidik pomza ve bazik pomza numuneleri 3 farklı noktada incelenmiş ve yüzeyde sırasıyla ortalama % 0,72 ve % 0,78 oranında azot (N) olduğu belirlenmiştir (Şekil 1 ve 2). Bu analiz sonucu, yüzeyde gözlenen N miktarı silanlama işleminin başarılı olarak sonuçlandığını göstermektedir. Çünkü, yüzeyde bulunan N miktarı silanlama işlemi için kullanılan amino fonksiyonlu silan uyumlaştırıcının yapısında bulunmaktadır.



Şekil 1. Yüzeyi Silanlanmış Asidik Pomzanın SEM Görüntüsü (SEM Image of the Surface Modified Acidic Pumice)



Şekil 2. Yüzeyi Silanlanmış Bazik Pomzanın SEM Görüntüsü (SEM Image of the Surface Modified Basic Pumice)

3.2. Su Emme Testi (Water Absorption Test)

Kompozitlerin 15 gün su emme testine maruz bırakıldıktan sonraki su emme değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Su emme testi numuneleri genelde 3. Gün sonunda sabit bir ağırlığa ulaşmıştır. Test sonuçları incelendiğinde asidik pomza içeren PP ve bazik pomza içeren PP , saf

PP'ye kıyasla yaklaşık 3 kat fazla su emme kapasitesine ulaşmıştır. Silanlama işlemine tabi tutulan asidik ve bazik pomza içeren numunelerin su emme değerleri silanlanmamış asidik ve bazik pomza içeren numunelere nazaran daha az olarak gözlenmiştir bunun nedeni silanlama işleminden sonra asidik ve bazik pomza yüzeylerinin suyu sevmeyen bir yapıya dönüşmesinden kaynaklanmaktadır. Ma-g-PP 'e asidik pomza ve bazik pomza eklenmesinden sonra benzer şekilde yaklaşık 3 kat fazla su emme kapasitesine ulaştığı gözlemlenmiştir.

Tablo 1. PP ve Kompozitlerin Su Emme Değerleri (Water Absorption Results of the PP and Composites)

Numuneler	Su Emilimi (%)
PP	0.22±0.02
PP/AP	0.63±0.03
PP/Si-AP	0.52±0.04
PP/BP	0.56±0.02
PP/Si-BP	0.50±0.03
MA-g-PP	0.18±0.05
MA-g-PP/AP	0.51±0.02
MA-g-PP/BP	0.61±0.03

3.3. Çekme Dayanım Testi (Tensile Test)

Kompozitlerin çekme testi sonuçları Tablo 2'de paylaşılmıştır. Çekme testi sonuçları incelendiğinde, asidik pomza ve bazik pomza eklenmesi ile PP matrisinin çekme dayanımında belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Fakat silanlama işlemi görmüş asidik ve bazik pomza eklenmesi ile kompozitlerin çekme dayanımında ve kopmada uzamalarında artış gözlenmiştir. Bu sonuç silanlama işlemi ile pomza tozlarının PP matrisine daha uyumlu hale gelmesinden kaynaklanmaktadır.

Yüzey işleminden sonra mekanik özelliklerindeki artışa, literatürde benzer çalışmalarda da rastlanmıştır. MA-g-PP matrisli olan kompozitlerde asidik ve bazik pomza eklenmesi, polipropilenin çekme dayanımında çok az bir artışa sebebiyet verirken uzama değerlerini bariz şekilde düşürmüştür. Silanlanmış asidik ve bazik pomza tozunun çekme dayanımında neden olduğu artışlar (% 5,0 ve % 3,6) , MA-g-PP kullanılarak elde edilen artışlara kıyasla (% 1,4 ve % 1) oldukça fazladır. Pomza kullanımı, genel olarak

çekme modülü değerlerinde artış ile sonuçlanmıştır [15,16].

Su emme testi uygulanan numunelerin çekme dayanım testi sonuçları incelendiğinde saf PP numunesi hemen hemen hiç su emmediği için test parametrelerinde belirgin farklılıklar gözlenmemiştir. Su emme testine maruz bırakılan kompozitlerin, test uygulanmayanlara göre dayanımlarında bütün numunelerde çok az miktarda düşüş, kopmada uzama değerlerinde çoğunlukla artış, çekme modül değerlerinde ise az miktarda artış şeklinde sonuçlanmıştır.

Tablo 2. PP ve Kompozitlerin Çekme Dayanımı Değerleri (Tensile Test Results of the PP and Composites)

Numuneler	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopmada Uzama (%)	Çekme Modülü (MPa)
PP	24.6±0.4 /24.5±0.6*	418.6±10.3 /419.8±12.8*	23.9±3.8 /30.8±5.0*
PP/AP	24.2±0.5 /23.5±0.7*	461.1±8.2 /435.6±10.1*	23.3±4.1 /25.3±3.2*
PP/Si-AP	25.4±0.4 /24.7±0.5*	484.2±9.4 /487.2±7.9*	29.4±3.7 /30.1±4.0*
PP/BP	25.2±0.5 /24.4±0.3*	470.1±13.3 /437.8±12.0*	25.2±3.2 /27.5±4.4*
PP/Si-BP	26.1±0.6 /25.8±0.4*	438.3±8.8 /433.7±9.4*	32.0±2.9 /31.9±3.5*
MA-g-PP	21.4±0.2 /21.1±0.3*	517.4±9.3 /523.7±8.4*	282.8±7.4 /296.6±5.2*
MA-g-PP/AP	21.7±0.2 /19.4±0.3*	95.9±8.0 /127.4±7.3*	343.7±8.5 /334.9±7.0*

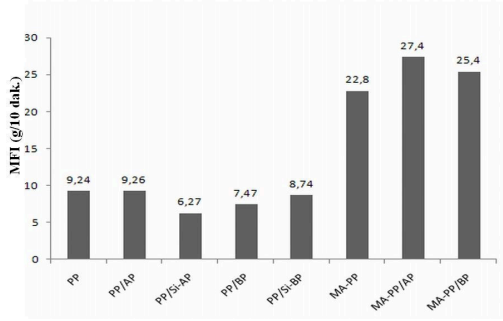
*15 günlük su emme testine tabi tutulmuş numunelerin çekme dayanımı değerleri

3.4. Erime Akış İndisi Testi (Melt Flow Index Test)

Kompozitlerin erime akış indisi değerleri Şekil 3'de verilmiştir. PP matrisine asidik pomza eklenmesi ile eriyik akış değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmezken, bazik pomza eklenmesi ile MFI değerinde bir miktar düşüş saptanmıştır. Silanlanmış asidik pomza içeren PP numunelerin MFI değerleri incelendiğinde bir miktar azalma gözlenmiştir. Bu sonuç silanlama işlemi sonrası yüzeylerin PP matrisine daha uyumlu olmasından kaynaklanmaktadır. Yüzeyi silanlanmış pomza içeren kompozitlerde PP zincirlerinin akışı, dolgu maddesi tarafından kısıtlandığından dolayı MFI değerleri bir miktar azalmaktadır [17,18].

Genel anlamda asidik veya bazik pomza yüklemesi, PP ve MA-g-PP üzerinde akışkanlık

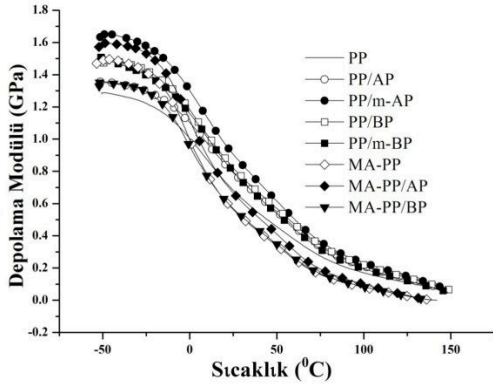
olarak aşırı farklılıklar sergilememektedir. Bu sonuç, PP/pomza kompozitlerinin üretim işlemlerinde herhangi bir probleme (karıştırmada zorlanma veya enjeksiyonda tıkanma vb.) rastlanmayacağı çıkarımını desteklemektedir [19,20].



Şekil 1. PP ve Kompozitlerin Erime Akış İndeksi Değerleri (Melt Flow Index Results of the PP and Composites)

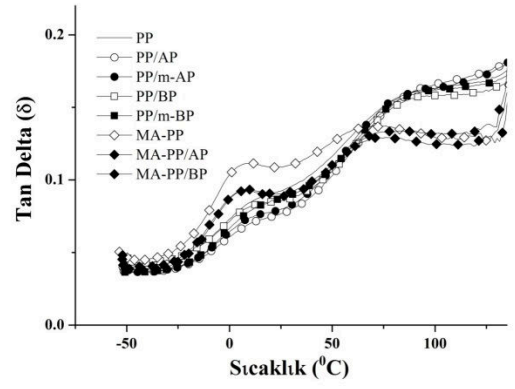
3.5. Dinamik Mekanik Analiz (Dynamic Mechanical Analysis)

Hazırlanan PP/AP ve PP/BP kompozitlerinin termo-mekanik özellikleri DMA ile karakterize edilmiştir. Saf polimer ve kompozitlerin depolama modülleri ve Tan δ grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 2. PP ve Kompozitlerin Depolama Modül Grafiki (Storage Modulus Graph of PP and Composites)

Pomza eklenmiş kompozitlerin depolama modülleri, saf PP ile karşılaştırıldığında hepsinin yüksek modül değerine sahip olduğu görülmektedir. Modifikasyon uygulanmış asidik pomza içeren kompozit en yüksek sonucu sergilemiştir. Asidik pomza, bazik pomzaya göre MA-g-PP kompozitlerinde de nispeten yüksek modül değerine sahiptir.



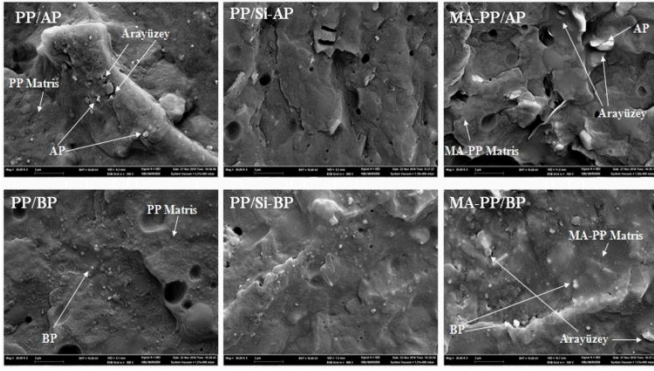
Şekil 3. PP ve Kompozitlerin Tan δ Grafiki (Tan δ Graph of PP and Composites)

Şekil 5 incelendiğinde; pomza tozu eklenmesi ile birlikte PP ve MA-g-PP polimerinin Tan δ değerlerinde düşme, pik değeri olan camı geçiş sıcaklıklarında (T_g) ise ufak artışlar meydana gelmiştir. Bir önceki çalışmamızda, huntit hidromagnezit içeren PP kompozitleri de benzer sonuçlar saptanmıştır [21].

3.6. Kompozitlerin Morfolojik Karakterizasyonu (Morphological Characterization of the Composites)

Şekil 6'da sunulan kompozitlerin SEM mikrofotografikleri incelendiğinde; modifiye edilmemiş AP ve BP parçacıklarının PP matris içinde topaklandığı ve dolgu-polimer arayüzeyinde yapışma olmadığından boşluklar oluştuğu saptanmaktadır. Silanlama işlemi uygulanmış AP ve BP içeren kompozitlerin mikrofotografiklerine bakıldığında, pomza tozunun PP içerisinde homojen dağılım gösterdiği ve parçacıkların polimer matris tarafından sarılarak yapıştığı anlaşılmaktadır.

Ma-g-PP kompozitlerinin mikrofotografiklerinde bir miktar topaklanma gözlenmekte olup, pomza parçacıklarının modifiyesiz pomza içeren PP kompozitlerine kıyasla daha homojen dağıldığı ayırt edilmektedir. Yapılan bu morfolojik gözlemler ışığında, pomzanın silanlanması ve uyumlaştırıcı içeren PP kullanımının, kompozitlerin mekanik özelliklerde iyileşme sağlamanın nedeni anlaşılmaktadır.



Şekil 4. Kompozitlerin SEM Mikrografları (Micrographs of the Composites)



4. ÇIKARIMLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışma ile ülkemizde farklı bölgelerde rezervleri bulunan asidik ve bazik pomza tozlarının polipropilen ve MA-g-PP ile hazırlanan kompozitlerinin mekanik, fiziksel ve morfolojik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, polimer ve dolgu malzemesinin birbirine uyumunu artırmak için kullanılan silanlama işlemi veya fonksiyonel grup içeren polimer matrisinin kullanılmasının bu özelliklere olan etkisi karşılaştırılmıştır. Mekanik test sonuçları incelendiğinde, silanlama işlemine tabii tutulmuş pomza minerali içeren kompozitlerin diğerlerine nazaran daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Silanlama işleminin mekanik özelliklere olan pozitif katkısı, Ma-g-PP matris kullanılarak uyumlaştırma işlemine göre daha iyidir. Buna ek olarak, silanlama işlemi, pomza yüzeyini suyu sevmeyen bir yapıya dönüştürdüğünden kompozitlerin su emme kapasitelerinde düşüş gözlemlenmiştir. Örneklerin erime akış indisi değerleri incelendiğinde, PP matrisine asidik pomza ve bazik pomza eklenmesi, erime akış indisi değerlerinde belirgin değişimlere neden olmadığı belirlenmiştir. Bu nedenle PP matrisine asidik pomza ve bazik pomza eklenmesinin kompozitlerin işlenmesi sırasında bir sorun oluşturmayacağı sonucuna varılmıştır. PP ve MA-g-PP matrislerine pomza eklenmesi, polimerlerin depolama modülü ve camsı geçiş sıcaklıklarını artırmıştır. Kompozitlerin SEM mikrografikleri incelendiğinde; modifiye edilmiş asidik ve bazik pomzanın PP matrisi içinde homojen şekilde dağıldığı, modifiye edilmeyen pomza parçacıkları ile PP arasında boşluklar olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey silanlama işlemi, polimer-dolgu arayüzey etkileşimlerini artırmıştır. Genel anlamda, MA-g-PP ile kıyasla PP matrisinde silanmış pomza kullanımı bir miktar daha iyi sonuçlar vermiştir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] S. Kıralp, G. Özkoç, S. Erdoğan, P. Çamurlu, M. Doğan ve T. Baydemir, "Modern çağın malzemesi plastikler," *ODTÜ Yayıncılık*, Ankara, Türkiye, pp.20-25, 2006.
- [2] G. Akovalı, "Handbook of composite fabrication," *Rapra Technology*, Shawbury, UK, pp.3-11, 2001.
- [3] M. Xanthos, "Functional fillers for plastics," *Wiley VCH*, Weinheim, Germany, pp.12-18, 2005.
- [4] N. Elmastaş, "Türkiye Ekonomisi için önemi giderek artan bir maden: Pomza (sünger taşı)," *Journal of International Social Research*, vol.5(23), pp.197-206, 2012.
- [5] B. Varol, "Pomza sektör raporu," *T.C. Ahiler Kalkınma Ajansı*, 2014.
- [6] M.D. Brasier, R. Matthewman, S. McMahon and D. Wacey, "Pumice as a remarkable substrate for the origin of life," *Astrobiology*, vol.11(7), pp.725-735, 2011.
- [7] S. Yazıcıoğlu, E. Arıcı and T. Gönen, "Pomza taşının kullanım alanları ve ekonomiye etkisi," *F.Ü. DAUM Dergisi*, vol.1,pp.118-123, 2003.
- [8] B. Han, Z. Sun, Y. Chen, F. Tian, X. Wang and Q. Lei, "Space charge distribution in low-density polyethylene (LDPE)/Pumice composite," *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Harbin, China, July 19-23, 2009.
- [9] P. Jayakrishnan and M.T. Ramesan, "Synthesis, characterization and properties of poly(vinyl alcohol)/chemically modified and unmodified pumice composites," *Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, Crystallography: Special Emphasis on Applications in Chemistry*, vol.1, pp. 97-104, 2016.
- [10] M.T. Ramesan, A. George, P. Jayakrishnan and G. Kalaprasad, "Role of pumice particles in the thermal, electrical and mechanical properties of poly(vinyl alcohol)/poly(vinyl pyrrolidone) composites," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol.126(2), pp.511-519, 2016.

- [11] K. Yılmaz, A. Akgoz, M. Cabuk, H. Karaagac, O. Karabulut and M. Yavuz, “Electrical transport, optical and thermal properties of polyaniline–pumice composites,” *Materials Chemistry and Physics*, vol.130(3),pp.956–961, 2011.
- [12] A. Gök, F. Göde and B.E. Türkaslan, “Synthesis and characterization of polyaniline/pumice (PAn/Pmc) composite,” *Materials Science and Engineering B*, vol.133(1-3),pp. 20–25, 2006.
- [13] R. Akkaya, “Uranium and thorium adsorption from aqueous solution using a novel polyhydroxyethylmethacrylate-pumice composite,” *Journal of Environmental Radioactivity*, vol.120,pp.58-63, 2013.
- [14] A.E. Sahin, Y. Yildiran, E. Avcu, S. Fidan and T. Sinmazcelik, “Mechanical and thermal properties of pumice powder filled PPS composites,” *Proceedings of the 3rd International Congress APMAS2013*, Antalya, Turkey, April 24-28, 2013.
- [15] D. Metin, F. Tihminhoglu, D.Balköse and S. Ülkü, “The effect of interfacial interactions on the mechanical properties of polypropylene/natural zeolite composites,” *Composites Part A-Applied Science and Manufacturing*, vol.35(1), pp. 23-32, 2004.
- [16] G.A. Öktem and T. Tincer, “Preparation and characterization of perlite-filled high-density polyethylenes. I. Mechanical properties,” *Journal of Applied Polymer Science*, vol.54(8),pp.1103-1114, 1994.
- [17] J.Z. Liang, L. Zhou, C.Y. Tang, C.P. Tsui and F.J. Li, “Melt flow behavior in capillary extrusion of nanometer calcium carbonate filled PCL bio-composites,” *Polymer Testing*, vol.31, pp.149-154, 2012.
- [18] A. Ariffin, S.S. Jikan, M.S.F. Samsudin, Z.M. Ariff and Z.A.M. Ishak, “Melt elasticity phenomenon of multicomponent (talc and calcium carbonate) filled polypropylene,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol.25(9),pp.913-923, 2006.
- [19] Ü. Tayfun, M. Doğan and E. Bayramlı, “Polyurethane elastomer as a matrix material for short carbon fiber reinforced thermoplastic composites,” *Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi A-Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik*, vol.18(3), pp.682-694, 2017.
- [20] R. Brown, “Handbook of Polymer Testing-Physical Methods,” *Rapra Technology*, Shawbury, UK, 1999.
- [21] Y. Kanbur and Ü. Tayfun, “Polipropilen/huntit kompozitlerinin mekanik, fiziksel ve morfolojik özellikleri,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol.21(5),pp.1045-1050, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 21-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.339213	
	<u>Kabul/Accepted</u> 01-12-2017	<u>Online Access</u>	

Dairesel kesite sahip merkezi çelik çaprazların performans analizi

Zeynep Yaman^{*1}, Elif Ağcakoca²

ÖZ

Yapıların, deprem ve rüzgâr yükleri gibi yatay yükler altında sünek davranması istenmektedir. Yapının sünek olması; kolon, kiriş gibi taşıyıcı yapı elemanlarının ve bu elemanların birleşim bölgelerinin yatay yükler altında yeterli dayanımı göstermesine bağlıdır. Çelik binaların yatay yüklere karşı yeterli performansı göstermesi için pek çok uygulama mevcuttur. Bu uygulamaların başında çelik perde sistemi kullanımı gelmektedir. Bu çalışmada hedeflenen; düzenli ve düzensiz geometriye sahip çelik binalarda, merkezi çelik çaprazlı perde türlerinden bazılarının, seçilen kesite göre yapısal performansının belirlenmesidir. Çalışmada kullanılan merkezi çelik çaprazlı perde türlerinin geometrisi diyagonal ve ters V olarak belirlenmiştir. Bu perde türlerinin çaprazlarında kullanılacak kesit geometrisi ise dairesel boru olarak seçilmiştir. Seçilen yapılarda diyagonal profillerin boyutları belirlenirken aynı kesit alanına sahip olmaları sağlanmış böylece yapı maliyetine de sınırlandırma getirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, düzenli ve düzensiz geometriye yapı performansının diyagonal ve ters V çapraz türlerindeki limit değerleri incelenmiştir. Diyagonal merkezi çelik çapraz perde sisteminin ters V merkezi çelik çapraz perde sistemine nazaran daha fazla enerji sönmüleme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Çalışmanın yapısal analiz ve sonlu eleman modellemesinde, doğrusal olmayan statik analiz yöntemi kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Push-over, merkezi çelik çaprazlar, performans analizi

Performance analysis of circular sieve owner center steel crosses

ABSTRACT

Structures are required to behave ductile under horizontal loads such as earthquake and wind loads. It is related that the structural members of the structure, such as columns, beams, and the junctions of these members have sufficient strength under horizontal loads. There are many applications for steel buildings to exhibit sufficient performance against horizontal loads. The main application of these applications is the use of the steel curtain system. The purpose in this study is to determine the structural performance of some of the types of central steel crossed curtains in steel buildings with regular and irregular geometry, according to the selected section. The geometry of the central steel crossed curtain types is determined as diagonal and reverse V. The section geometry to be used for the crosses of these curtain types is chosen as circular pipe. When the dimensions of the diagonal profiles are selected in the selected structures, the same cross-sectional area is provided so that the construction cost is limited. The end of our analysis, the limit value of the performance of steel structures with regular and irregular geometries was investigated for diagonal and inverse crossing. The diagonal central steel cross curtain

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, zdyaman@sakarya.edu.tr

² Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, elifd@sakarya.edu.tr

system has been found to have more energy damping capacity than the reverse V center steel cross curtain system. The nonlinear static analysis method was used in the structural analysis and finite element model of the study.

Keywords: Push-over, central steel crosses, performance analysis

1. GİRİŞ

Çelik bir bina tasarlanırken, kullanılacak perde sistemi seçimi, yapının deprem ve rüzgar yükleri altındaki davranışını büyük ölçüde değiştirmektedir. Bu değişim, sağladığı dayanıklılık açısından olumlu etki göstermektedir. Ayrıca çelik yapılarda çelik perde kullanımının, betonarme perde kullanımına kıyasla yapıya sağladığı hafiflik ve süneklik yapı davranışı için avantaj sağlamaktadır. Bu nedenle, depreme dayanıklı çelik yapı tasarımında perde seçimi oldukça önemlidir. Çelik perde seçiminde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, uygun çapraz sisteminin ve bu çapraz sisteminde kullanılacak profill kesitinin seçimidir.

Çelik yapılarda kullanılan çaprazlar iç merkezi ve dış merkezi çaprazlar olarak ikiye ayrılır. Yapının birincil elemanları olan kolon, kiriş, çapraz elemanların deprem yönetmeliğinde verilen şartları sağlayarak, eleman eksenlerinin eksantirisite oluşturmayacak şekilde merkezi olarak birleştirilmesi ile merkezi çelik çaprazlar oluşturulur. Merkezi çaprazlı çerçeveler, sadece moment aktaran çerçevelerden daha düşük süneklikli olacak şekilde tasarlanır [1,2]. Merkezi çelik çaprazlı perdeler, moment aktaran çelik çerçeve sistemler ile karşılaştırıldığında büyük elastik yatay rijitliğe sahiptir [3].

1.1. Literatür Araştırması

Bu bölümde çelik yapılarda performansa dayalı analize dair yapılmış deneysel ve teorik çalışmalara değinilmiştir.

Çeşitli geometriye sahip yapıların, değişik çelik çapraz şekilleri ile yatay yük taşıma kapasiteleri incelenmiş ve taşıyıcı sistem davranış katsayıları FEMA ile karşılaştırarak çelik çapraz tiplerinin önemi vurgulanmıştır [4].

Çok katlı çelik yapıların performansa dayalı hesap yöntemleri üzerinde durulmuştur. Kapasite spektrum metodu ve deplasman katsayıları metodu kullanarak yapıların performans değerlendirilmesi yöntemi geliştirilmeye çalışılmıştır. Bununla

birlikte taşıyıcı sistemin ve yapı elemanlarının sahip olması gereken nitelikleri açıklamıştır [5].

Üç farklı çapraz eleman ile dört tip yapı modeli oluşturulmuş, toplam on iki tane merkezi çaprazlı model yapı üzerinde çalışılmıştır. Boyutlandırmada doğrusal olmayan statik artımsal itme analizi ve hedef yer değiştirme değerlerini belirlemede de performansa bağlı analiz yöntemlerinden biri olan yer değiştirme katsayıları yöntemi kullanılmıştır. 1999 Düzce ve 1992 Erzincan depremlerinden elde edilen ivme kayıtlarıyla, model yapıların zaman tanım alanında hesap yöntemi kullanılarak dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir [6].

Kutu kesite sahip çelik profiller kullanılarak dışmerkezi ters V ile V çelik çapraz perde sistem sayesinde dayanıklılığı arttırılan, 2 katlı 3 boyutlu çerçeve sistemler sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışmada yönetmeliğin öngördüğü bağ kirişi uzunlukları, dışmerkezi çapraz perdeli çelik çerçevenin yanal yük taşıma kapasitesi üzerine etkisi incelenmiştir [7].

Deprem yönetmeliğine göre planda düzensizliğe sahip çelik bir yapının güçlendirilmesin konusu incelenmiş ayrıca üç farklı planda düzensiz model yapılar ele alınarak, betonarme perde ve çapraz elemanlar kullanılarak çelik yapıların dayanıklılığı arttırılmıştır. Sonuç olarak yatay yükler etkisi altında çelik yapılarda betonarme perde ve merkezi çelik çaprazların performansa katkısı incelenmiştir [8].

Moment çerçeveleri ile birlikte perde duvarlar veya çaprazların beraber kullanıldığı karma sistemler, ASCE 7-05 te belirtilen “karma sistemlerde moment çerçeveleri yatay yüklerin %25 ini karşılamalıdır” kuralı dikkate alınarak incelenmiştir. Bunun için taşıyıcı sistemi moment çerçeveleri olan ve deprem talebinin yüzde 15, 25 ve 40’ını karşılayacak şekilde tasarlanmış karma sistemlerden oluşan 12 katlı, 16 katlı ve 20 katlı yapılar merkezi çelik çaprazlı olarak tasarlanmış ve binaların lineer statik ve push-over analizi yapılmıştır [9].

Doktora tez çalışmasında, her iki yönde süneklik düzeyi yüksek merkezi çaprazlı çelik çerçeve sistem oluşturularak, Çelik Yapıların Tasarım

Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik 2016 (ÇYTHYEEY) ve taslak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2016 (TBDY)'ya göre doğrusal olmayan statik itme analizi ve dinamik zaman tanım alanı analizleri yapılarak yapı performansı incelenmiştir [10].

Türk Deprem Yönetmeliği 2007'ye göre tasarlanan çelik endüstri yapılarında farklı çaprazlı perde alternatiflerinin deprem performansları incelenmiştir [11].

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, aynı kesit alanına sahip profiller ile yapılmış birbirinden farklı merkezi çelik çaprazlı perdelerin yatay yükler altında yapı davranışına olan etkilerinin karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırma, hem çelik perde türleri arasında hem de planda düzenli ve düzensiz yapılar arasında yapılmıştır. Çelik çaprazlı perdelerin teşkilinde aynı kesit alanına sahip profillerin seçilmesindeki neden, performansları karşılaştırılan yapı maliyetlerinin yaklaşık olarak aynı olmasını sağlamaktır. Çalışmada, maliyetleri yaklaşık eşit olan yapı sistemleri için, planda düzenli ve düzensiz bir yapının doğrusal olmayan davranışını daha olumlu etkileyecek perde türünün belirlenmesi hedeflenmiştir.

Yatay yükler altında gerçek yapı davranışına yakın çözüm yapmak için yapı sistemlerinin çözümlenmesinde malzemenin gerçek davranışı ve yapı geometri değişimlerinin göz önüne alındığı doğrusal olmayan statik analiz kullanılmıştır.

Çalışma kapsam açısından, merkezi çelik çaprazlı perdeleri, doğrusal olmayan yapı davranışını ve sonlu eleman modellemesini içermektedir. Merkezi çelik çaprazlı perde olarak, Türk Deprem Yönetmeliğinde verilen çelik çapraz türlerinden birkaçı dikkate alınmıştır [12].

2. ÇELİK YAPILARDA PERFORMANS KAVRAMI VE KABULLER

Bir yapının deprem sonrası mekanizma durumuna (göçme moduna) geçmemesi için iki koşul vardır. Bunlardan birincisi dayanım, ikincisi sünekliktir. Depreme dayanıklı yapı tasarlarken, depremin yapıdan isteyeceği maksimum kuvvet göre veya depremin yapıdan talep ettiği sünekliğe göre tasarım yapmak mümkündür [13]. Depremin yapıdan isteyeceği maksimum kuvvete göre tasarım olan dayanıma göre tasarımda, depremin istediği maksimum kuvvet esas alındığından, yapı

maliyeti çok yüksek ve taşıyıcı kesitler büyük olmaktadır. Depremin istediği maksimum kuvvete göre değil, depremin yapıdan talep ettiği sünekliğe göre tasarım ise süneklik kabiliyeti yüksek çelik malzemenin yapılan bir yapı için daha avantajlı olacaktır. Deprem yüklerinin deprem yönetmeliklerinde yer alan taşıyıcı sistem davranış katsayısıyla azaltılması bu nedenle yapılır [14]. Yapı için performans kavramı da bu nokta da başlar. DBYBHY 2007 ye göre bir binanın performansı doğrusal elastik yöntemler (eşdeğer deprem yükü yöntemi, mod birleştirme yöntemi) veya doğrusal elastik olmayan yöntemler (artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi, artımsal mod birleştirme yöntemi ve zaman tanım alanında hesap yöntemi) ile hesaplanabilir [15].

Deprem yönetmeliğinde açıklanan doğrusal elastik olmayan hesap yönteminin amacı, verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekildeğiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanması ve daha sonra bu istem büyüklüklerinin, DBYBHY 2007 bölüm 7'de tanımlaması bulunan, şekildeğiştirme ve iç kuvvet kapasitesi karşılaştırılarak, kesit ve bina bazında yapısal performans değerlendirmesi yapılmasıdır [15][16].

DBYBHY 2007 Bölüm 7.8 de, mevcut yapıların değerlendirilmesinde ve güçlendirme esasında kullanılacak üç deprem tehlikesi tanımlanmıştır: Tanımlanan birinci deprem düzeyi, yapıların servis ömürleri boyunca meydana gelebilmesi olasılığı fazla olan, göreceli olarak sık ancak şiddeti çok yüksek olmayan deprem yer hareketlerini ifade etmektedir. Bu depremin 50 yılda aşılma olasılığı %50, buna karşı gelen dönüş periyodu ise 72 yıldır. İkinci deprem düzeyi, yapıların servis ömürleri boyunca meydana gelebilmesi olasılığı çok fazla olmayan, seyrek ancak şiddetli deprem yer hareketlerini ifade etmektedir. Bu depremin 50 yılda aşılma olasılığı %10, buna karşı gelen dönüş periyodu ise 475 yıldır. Üçüncü deprem düzeyi, yapıların maruz kalabileceği en şiddetli deprem yer hareketini ifade etmektedir. Bu çok seyrek depremin 50 yılda aşılma olasılığı %2, buna karşı gelen dönüş periyodu ise 2475 yıldır [12].

2.1. Performans Analizindeki Kavramlar

Taşıyıcı elemanların kesitleri elastik gerilmeye ulaşsa bile, genel olarak bir dayanım fazlalığına sahip olmaktadır. Bu dayanım fazlalığı, çeliğin uzayabilen bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca bu dayanım fazlalığı, yapı sisteminin türüne ve yüke bağlı olarak değişir.

Bir yapının gerçek davranışını belirlenmesi için kullanılan bu yakınsamalar ve kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

Sünek yapılarda elastik ötesi idealleştirme Şekil 1’ de gösterildiği gibidir. Şekilde yer alan f_e ; maksimum kuvvet, f_y ; dayanım kuvveti, f_d ; tasarım kuvvetini, u_d ; tasarım yer değiştirmeyi, u_y ; dayanım kuvvetine karşılık gelen yer değiştirmeyi, u_e ; elastik yer değiştirmeyi, u_{mak} ; yapının maksimum yapacağı yer değiştirmeyi simgelemektedir. Süneklik;

$$\mu = \frac{u_{mak}}{u_y} \quad (1)$$

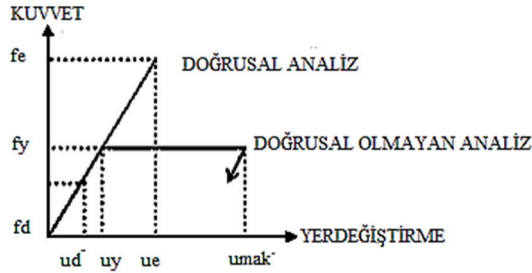
dayanım fazlalığı;

$$D = \frac{f_y}{f_d} \quad (2)$$

taşıyıcı sistem davranış katsayısı;

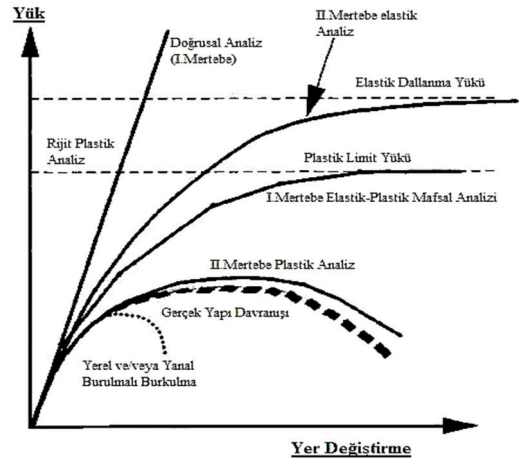
$$R = \mu.D \quad (3)$$

bağıntılarıyla hesaplanırlar.



Şekil 1. Çelik yapıda elastik ötesi idealleştirilmiş davranış

Çelik yapılar, maruz kaldıkları yükler altında doğrusal olmayan davranış sergilerler. Bu davranışlarını ifade edebilmek için farklı çözüm yöntemleri kullanılmaktadır. Gerçeğe en yakın yapı davranışını saptayabilmek için ikinci mertebe plastik çözümleme yapılması gerekmektedir [17]. Çeşitli analizlerin gerçek yapı davranışına yakınsaklıkları Şekil 2 deki gibidir.



Şekil 2. Çeşitli analiz yöntemleri ve gerçek yapı davranışı[19]

Plastik analiz, ele alınan yapı sistemindeki yapısal elemanlara ait kesit zorlarının malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisinde bulunan doğrusal bölge dışındaki kısmına yük taşınması durumunda yapılan çözümlerdir.

2.2. Plastikleşme Momenti ve Plastik Mafsallı

Plastik mafsallı kavramını anlayabilmek için Eğilme davranışı gösteren bir yapı elemanın gerilme-şekil değiştirme diyagramını incelememiz gerekir. Eğilmeye maruz kalan yapı elemanın en dış liflerindeki gerilme değeri, artan yükleme karşısında, malzemenin şekil değiştirmeden karşı koyabileceği maksimum dayanım değerine ulaşan ilk bölgedir. Eleman en kesitin en dış liflerinde bu değişimler meydana gelirken, en dış liflerden en kesitin ağırlık merkezine doğru gidildikçe, bu bölgelerin henüz dayanım ve şekil değiştirme kapasitelerini doldurmadığı görülür. İşte en kesitteki tüm liflerin dayanım ve şekil değiştirmede maksimum kapasiteye ulaştığı anda, elemandaki kesit momentine M_p “plastikleşme momenti” adı verilir ve tüm liflerin yükleme karşısında dayanımını kaybettiği bu bölgeye de plastik mafsallı bölge denir. Plastik mafsallaşma ile M_p momentine karşılık gelen plastikleşme, bu momentin oluştuğu noktada yer alan kiriş kesitinde meydana geldiği kabul edilir. Maksimum momentin oluştuğu noktada bütün kesitin plastikleştiği hale karşı gelen M_p moment oluşmasını sağlayan P yük değeri tekrar arttırılmaya çalışılırsa, M_p momentine ulaşan bölge, bu yük artımı ile yapısal bir mafsallı davranışı gösterir. Kesitin tamamının plastikleştiği ve M_p momentine ulaştığı anda bu kesitin yer aldığı kiriş noktasında plastik mafsallı oluşmuştur denir [18]

Plastik mafsal, doğrusal olmayan çözümlemelerde kesit modelinin davranışını temsil etmektedir. Davranışın tanımlanması için iki farklı kullanım yaklaşımı vardır;

1. Yayılı plastik mafsal; yapı sistemlerindeki taşıyıcı elemanların yüklere maruz kalması sonucu oluşan akmanın eleman boyunca gerçekleştiği varsayımı yapılır.
2. Yoğunlaştırılmış plastik mafsal; yapı sistemlerindeki taşıyıcı elemanların yüklere maruz kalması sonucu oluşan akmanın elemanın bir noktasında meydana geldiği varsayımı yapılır.

2.3. Plastik Mafsal Hipotezi

Yatay yükler altında yeteri kadar süneklik gösteren bir model yapı, doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin plastik mafsal adı verilen noktalarda toplandığı, diğer bölgelerde ise sistemin doğrusal elastik olarak davrandığı düşünülmektedir. Bu kabul plastik mafsal hipotezi olarak adlandırılır. Bu kabulün geçerli olması için plastik deformasyonların meydana geldiği bölge çok fazla olması istenmemektedir.

Plastik mafsalın dönmesi ile dönme kapasitesi olarak tanımlanan sınır değere eşit ulaşıncaya kesit taşıma kapasitesinin kaybeder ve sistem göçme mekanizmasına geçer. Dönme kapasitesinin yaklaşık olarak hesabı, $\theta_p = l_p \cdot \phi_p$ şeklindedir. Buradaki; θ_p dönme kapasitesini, l_p plastik mafsal boyunu, ϕ_p kesitin yapacağı maksimum eğriliği temsil etmektedir. l_p değeri, çelik yapı birleşim türüne göre farklılık göstermektedir.

Çelik yapılar da alın levhalı takviye levhasız moment birleşimleri, AISC-LRFD standardına uygun tasarlanırsa, plastik mafsal kiriş üzerinde oluşur ve bu durumda plastik mafsal boyu kiriş derinliğinin yarısına eşit olduğu kabul edilir [20].

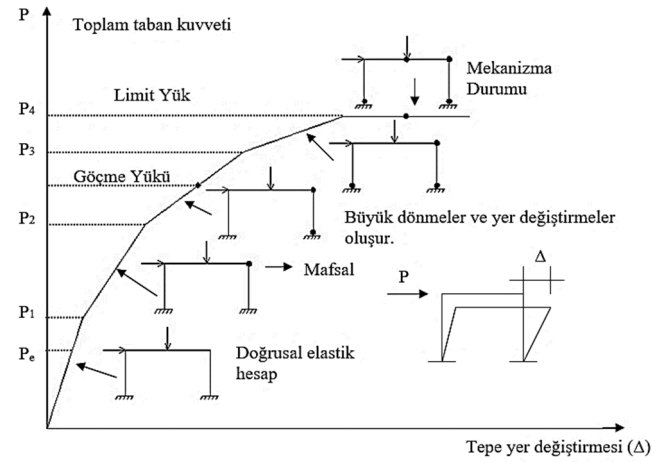
Bu çalışmada, doğrusal olmayan statik çözümlemelerde, bu hipotezden yararlanılmıştır.

2.4. Artan Yanal Yükler Altında Doğrusal Olmayan Yapı Davranışı

Gerçekte çoğu çelik yapı sistemi hiperstatiktir. Hiperstatik derecesine sahip taşıyıcı sistemlerde elastik bölgenin dışında yükleme yapıldığında elastik durum ile karşılaştırıldığında daha fazla yük taşıdığı bilinmektedir.

Yapıların normalde üzerlerinde bulunan mevcut yükler altında emniyet sınırları içerisinde kalması

hedeflenir. Bazı durumlarda, örneğin; deprem olması durumunda yapı bu dış yükü histeretik davranışını bozmayacak şekilde yani plastikleşme göstermeyecek şekilde karşılaşması istenmektedir. Bu durum, yapılarda performans analizi gerçekleştirilerek belirlenen performans seviyesi olarak da bilinmektedir. Emniyet sınırı olarak; kullanıma devam, plastikleşmeye geçmeme sınırı olarak da hemen kullanım performans seviyeleri belirlenmiştir. Şekil 3 incelendiğinde, düzlem çerçeve sistemin hiperstatiklik derecesi uygulanan yükün artmasıyla azalmakta ve belli bir yük değeri sonucu sistem mekanizma durumuna geçmektedir. Mekanizmanın oluşmasına sebep olan yüke de limit yük denir. Bu yük sistemin bir kısmını etkileyebileceği gibi, sistemin tümünde de etkinlik gösterebilir. Mekanizma durumu, sistemde belli sayıda plastik mafsal oluşmasıyla kısmen ya da tamamen sistemin yük taşıyamaz hale gelmesidir.



Şekil 3. Mekanizma durumları

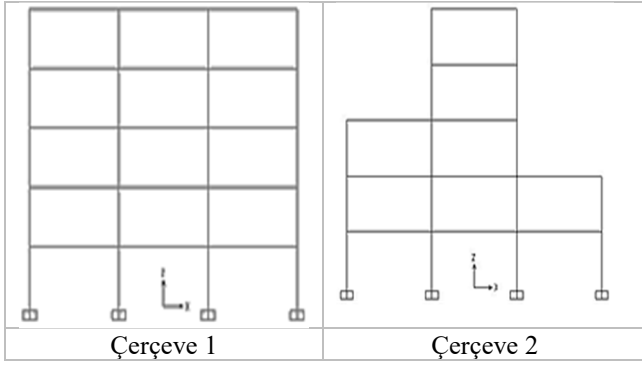
3. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Bu çalışmada yatay ve düşey planda düzenli ve düzensiz olan iki yapı modeli belirlenmiştir. Düşey yükler etkisi altında yapıda mafsallaşma gerçekleşmemesi için kolonların kirişlerden daha rijit olması gerekmektedir. Bu sebeple seçilen çerçeve sistemleri için kolon kesitlerine ait atalet momenti ve kesit alanı kiriş kesitlerine oranla daha büyük alınmıştır. Çerçeve sistemi için seçilen kolon profil ve kiriş profil tek tiptir. Kolonlar için IPE300, kirişler için IPE240 Avrupa profilleri ön görülmüştür (Tablo 1).

Tablo 1. Seçilen kolon ve kiriş profil enkesitleri

Yapı Elemanı / Profil	Atalet momenti (cm ⁴)	Kesit alanı (cm ²)
Kolon / IPE300	8356	53.8
Kiriş / IPE240	3892	39.1

Şekil 4’de görülen çerçeve tipleri çalışma kapsamında incelenen çerçeve tipleridir.



Şekil 4 Analizlerde kullanılan yapı modelleri

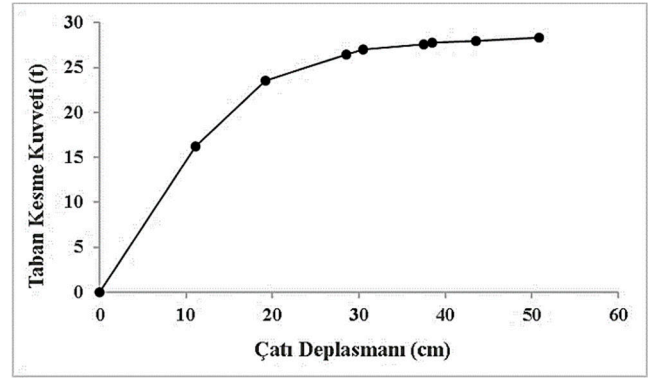
Her iki çerçeve, x yönünde 3, z yönünde 5 açıklıklı olup açıklık mesafeleri x yönü 6 metre, z yönü 3 metredir. Kirişlerin üzerine 1 t/m’ lik çizgisel düşey yük tanımlanmıştır. Çelik malzeme akma dayanımı ise 2,40 t/cm²’ dir.

Söz konusu düzlem çerçeve sistemlerde doğrusal olmayan statik analizinin gerçekleştirilebilmesi için bir yan yük şablonu tanımlanmalıdır. Bunun için modal analizden yararlanılmıştır.

Bu analiz ile yapının dinamik özellikleri elde edilmiştir. Bu analiz sonrası elde edilen verilerle depremin dinamik karakteri karşılaştırılarak yapıya etkimesi muhtemel deprem yükleri saptanmıştır. Bu nedenle, yan yük şablonu olarak x yönü hâkim periyoduna karşı gelen yapı mod şekilleri tercih edilmiştir.

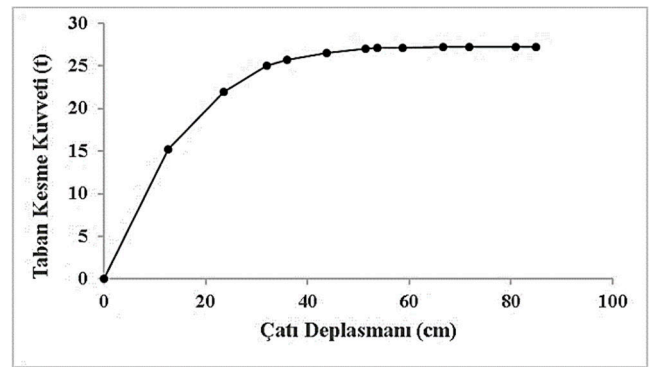
Analizler Sap 2000 sonlu eleman programı kullanılarak yapılmıştır. Sonlu eleman ile yapılan çözümleme de çerçeve geometrileri oluşturulmuş ve düşey yüklemeler tanımlanmıştır. Yapı elemanları için plastik kesit tanımlamaları yapılmıştır. Bu tanımlamada kirişlerin eğilme momenti (M3) etkisinde, kolonların aksel yük ve eğilme momenti (P-M3) etkisinde, perde elemanların ise aksel yük (P) etkisinde mafsallaşacağı ön görülmüştür.

Analiz sonucunda Çerçeve_1 ve Çerçeve_2 için elastik ve plastik limit değerleri hesaplanmıştır. Çerçeve 1 için elastik limit değeri, 16.25t taban kesme kuvveti etkisi ile 11.06cm çatı deplasmanı olarak hesaplanırken, plastik limit değeri, 28.38t taban kesme kuvveti etkisi ile 50.88cm olarak hesaplanmıştır(Şekil 5).



Şekil 5. Çerçeve 1 performans eğrisi

Çerçeve 2 için 12.59cm çatı deplasmanını oluşturan 15.25t taban kesme kuvveti etkisi elastik limit değeri olarak hesaplanırken, 84.91cm çatı deplasmanını oluşturan 27.25t taban kesme kuvveti etkisi plastik limit değeri olarak hesaplanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Çerçeve 2 performans eğrisi

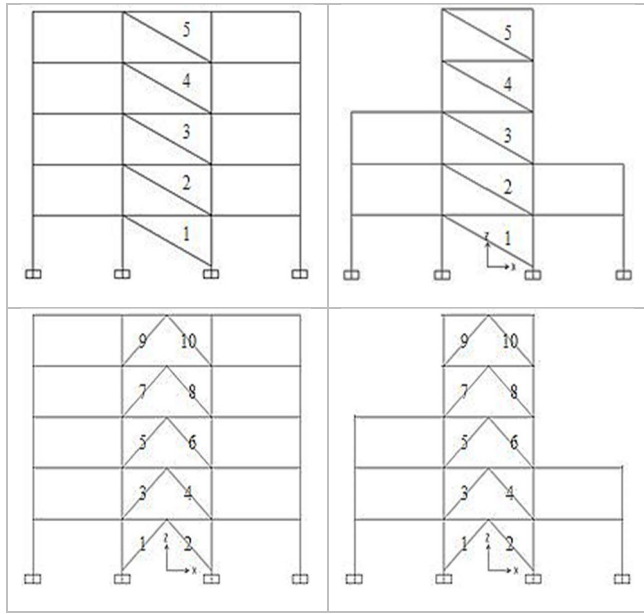
3.1. Çelik çapraz perde sistemli çerçevelerde performans analizi

Çalışma kapsamında incelenen çerçevelerin dairesel kesitli diagonal ve ters V merkezi çaprazı ile güçlendirilmesi ile yapının deprem yükleri etkisi altında performansı incelenmiştir (Tablo 2). Çaprazlarda kullanılan dairesel profilde cidar kalınlığı 10mm kesit alanı 28.27 cm² olarak belirlenmiştir.

Bu iki farklı çerçevede bulunan diyagonaller; daire kesit kullanılarak oluşturulmuş ve çerçevelerin doğrusal olmayan statik analiz yapılarak II. Mertebe Elasto- Plastik Limit yük değeri hesap edilmiştir. Limit Yük değerine karşı gelen çatı deplasman ve taban kesme kuvvet değerleri ile birlikte çelik perde sistemini çerçeveleyen yapı elemanlarında oluşan deformasyonlar kıyaslanmıştır. Ele alınan bu yapının yapı elemanlarının numaralandırılması Şekil 8 de verilmiştir.

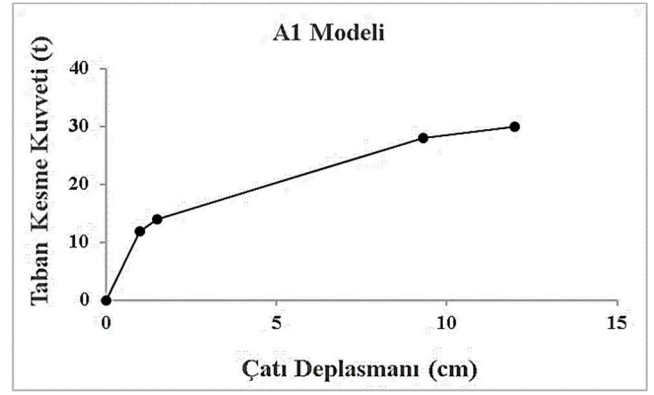
Tablo 2. Merkezi çelik çaprazlarla güçlendirilmiş model çerçeveler

Perde Sistemi Çapraz Sistem	Çerçeve Tipi	
	Çerçeve_1	Çerçeve_2
Diyagonal Çapraz	A1	A2
Ters V Çapraz	B1	B2



Şekil 7 Yapı elemanlarının numaralandırılması

A1 model yapısı için 1 cm çatı deplasmanına karşılık gelen 11,87 t' luk taban kesme kuvveti elastik limit değerini verirken, 12 cm deplasmana karşılık gelen 30 t taban kesme kuvveti plastik limit değerini vermektedir.(Şekil 8, Tablo 4)

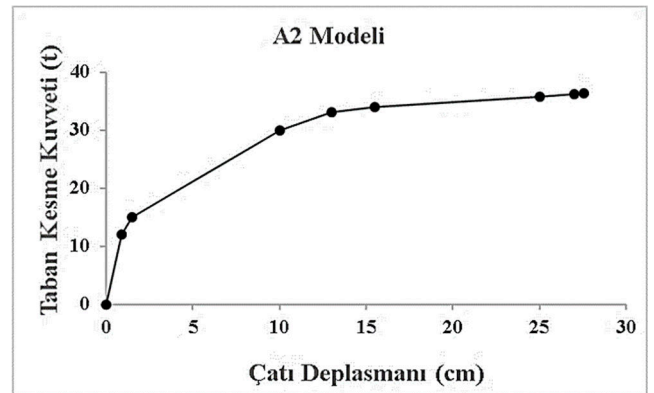


Şekil 8. A1 model yapısı performans eğrisi

Tablo 3. A1 model yapısı mafsallaşma bilgileri.

Eleman	P (ton)	Plastik U (cm)	M ₃ (tcm)	Plastik R (rad)	Karakter P-M	Hasar (FEMA)
Kiriş 1 (Sağ)	---	---	-973.14	-0.0017	Basınç	≤ AY
Kiriş 2 (Sağ)	---	---	-976.51	0.0032	Basınç	≤ AY
Diyagonal 1 (Üst)	-10.25	-0.99	---	---	Basınç	≥ GK
Diyagonal 1 (Alt)	-10.32	-0.98	---	---	Basınç	≥ GK
Diyagonal 2 (Üst)	-9.22	-1.70	---	---	Basınç	≥ GK
Diyagonal 2 (Alt)	-9.28	-1.70	---	---	Basınç	≥ GK
Diyagonal 3 (Üst)	-9.31	-1.39	---	---	Basınç	≥ GK
Diyagonal 3 (Alt)	-9.37	-1.38	---	---	Basınç	≥ GK
Diyagonal 4 (Üst)	-10.70	-0.64	---	---	Basınç	≥ GK
Diyagonal 4 (Alt)	-10.76	-0.64	---	---	Basınç	≥ GK
Diyagonal 5 (Üst)	-10.75	0.00	---	---	Basınç	≤ AY
Diyagonal 5 (Alt)	-10.81	-0.06	---	---	Basınç	≥ GK

A2 model yapısı için 0.90cm çatı deplasmanına karşılık gelen 12.02 t taban kesme kuvveti elastik limit değeri olarak hesaplanırken, 27.53 cm çatı deplasmanına karşılık 36.39 t taban kesme kuvveti plastik limit değeri olarak hesaplanmıştır (Şekil 9, Tablo 5).

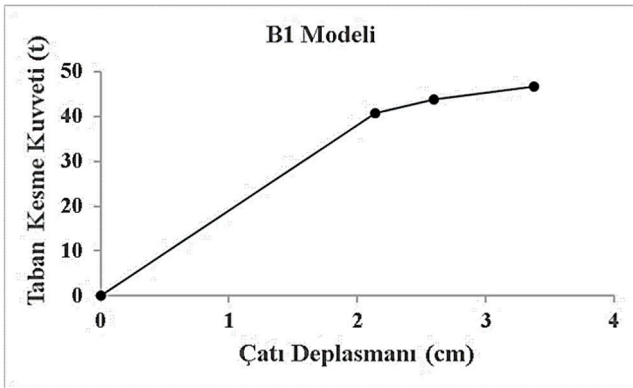


Şekil 9. A2 model yapısı performans eğrisi

Tablo 4. A2 model yapısı mafsallaşma bilgileri

Eleman	P (ton)	Plastik U (cm)	M ₃ (tcm)	Plastik R (rad)	Karakter P-M	Hasar (FEMA)
Kolon 1 (Alt)	-2.38	0.00	1805.90	0.0145	Basınç-Çekme	AY - CG
Kolon 3 (Üst)	2.93	0.0009	-1652.66	-0.0002	Çekme-Basınç	≤ AY
Kolon 6 (Alt)	-44.41	-0.03	1705.72	0.0158	Basınç-Çekme	≥ GK
Kiriş 1 (Sol)	---	---	963.96	0.0005	Çekme	≤ AY
Kiriş 1 (Sağ)	---	---	-1026.94	-0.0244	Basınç	AY - CG
Kiriş 2 (Sol)	---	---	966.84	0.0000	Çekme	≤ AY
Kiriş 2 (Sağ)	---	---	-1021.58	-0.0224	Basınç	AY - CG
Kiriş 3 (Sağ)	---	---	-993.32	-0.0141	Basınç	AY - CG
Diagonal 1 (Üst)	-7.48	-3.12	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 1 (Alt)	-7.54	-3.10	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 2 (Üst)	-6.76	-3.67	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 2 (Alt)	-6.83	-3.65	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 3 (Üst)	-7.08	-3.12	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 3 (Alt)	-7.15	-3.10	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 4 (Üst)	-9.42	-1.63	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 4 (Alt)	-9.48	-1.62	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 5 (Üst)	-11.27	-0.20	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 5 (Alt)	-11.34	-0.20	---	---	Basınç	≥ GK

B1 model yapısı için elastik limit değeri, 2.14cm çatı deplasmanına karşılık gelen 40.75 t taban kesme kuvveti etkisi olarak hesaplanırken, plastik limit değeri, 3.38cm çatı deplasmanına karşılık gelen 46.69 t taban kesme kuvveti etkisi olarak hesaplanmıştır (Şekil 10, Tablo 6).



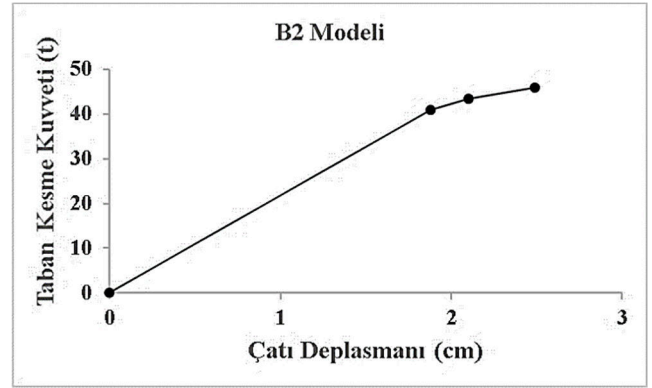
Şekil 10. B1 model yapısı performans eğrisi

Tablo 5. B1 model yapısı mafsallaşma bilgileri

Eleman	P (ton)	Plastik U (cm)	M ₃ (tcm)	Plastik R ₃ (rad)	Karakter P-M	Hasar (FEMA)
Kolon 6 (Alt)	-85.83	0.00	517.40	0.00	Basınç-Çekme	≤ AY
Diagonal 2 (Üst)	-27.46	-0.35	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 2 (Alt)	-27.53	-0.35	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 4 (Üst)	-22.93	-1.18	---	---	Basınç	≥ GK
Diagonal 4 (Alt)	-23.00	-0.10	---	---	Basınç	AY - CG
Diagonal 6 (Üst)	-28.21	-0.047	---	---	Basınç	≤ AY
Diagonal 6 (Alt)	-28.28	-0.047	---	---	Basınç	≤ AY

B2 model yapısı için elastik limit değeri, 1.88cm çatı deplasmanını oluşturan 40.86 t taban kesme

kuvveti etkisi olarak hesaplanırken, plastik limit değeri, 2.49 cm çatı deplasmanını oluşturan 46.02t taban kesme kuvveti etkisi olarak hesaplanmıştır (Şekil 11, Tablo 7)



Şekil 11. B2 model yapısı performans eğrisi

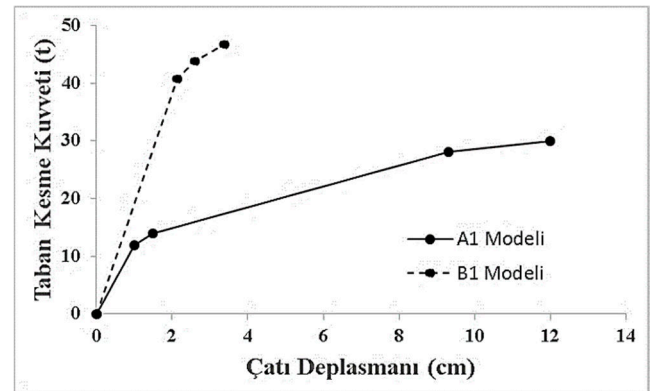
Tablo 6. B2 model yapısı mafsallaşma bilgileri

Eleman	P (ton)	Plastik U (cm)	M ₃ (tcm)	Plastik R (rad)	Karakter P-M	Hasar (FEMA)
Diagonal 2 (Üst)	-28.39	-0.17	--	--	Basınç	≥ GK
Diagonal 2 (Alt)	-28.46	-0.17	--	--	Basınç	≥ GK
Diagonal 4 (Üst)	-28.75	-0.10	--	--	Basınç	≥ GK
Diagonal 4 (Alt)	-28.82	-0.10	--	--	Basınç	≥ GK

4. SONUÇLAR

Analizler sonucu yapı performans eğrileri elde edilmiştir. Bu eğriler altında kalan alan yapının sönümlendiği enerji miktarını göstermektedir. Bu alan ne kadar büyük olursa yapı o kadar fazla enerji sönümlenmektedir.

A1 modeli B1 modeli ile kıyaslandığında; diyagonal merkezi çelik çapraz perde sistemi ile tasarlanan düzenli geometriye sahip çerçevenin, ters V merkezi çelik çapraz perde sistemi ile tasarlanan düzenli geometriye sahip çerçeveden daha fazla enerji sönümlene kapasitesine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 12, Tablo 8).

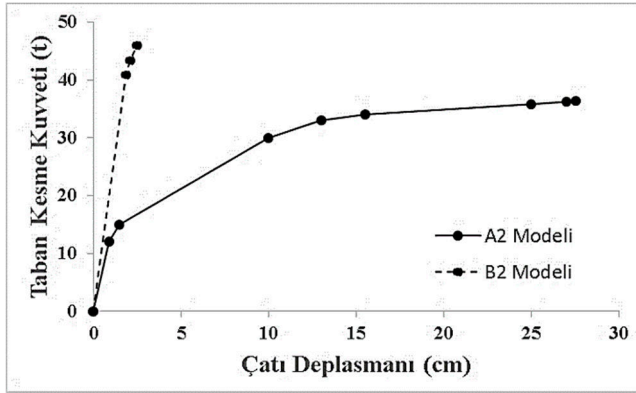


Şekil 12. A1 ve B1 Modeli Performans eğrileri

Tablo 7. A1 ve B1 Modeli Performans Değerleri

	Elastik sınır (cm)	Taban kesme kuvveti (ton)	Plastik sınır (cm)	Taban kesme kuvveti (ton)
A1	1.00	11.87	12.00	30.01
B1	2.14	40.75	3.38	46.69

A2 modeli B2 modeli ile kıyaslandığında; düzenli geometriye sahip çerçevedeki enerji sönümlenme kapasitesine benzer olarak, diyagonal merkezi çelik çapraz perde sistemi ile tasarlanan düzensiz geometriye sahip çerçevenin, ters V merkezi çelik çapraz perde sistemi ile tasarlanan düzensiz geometriye sahip çerçeveden daha fazla enerji sönümlenme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 13, Tablo 9).

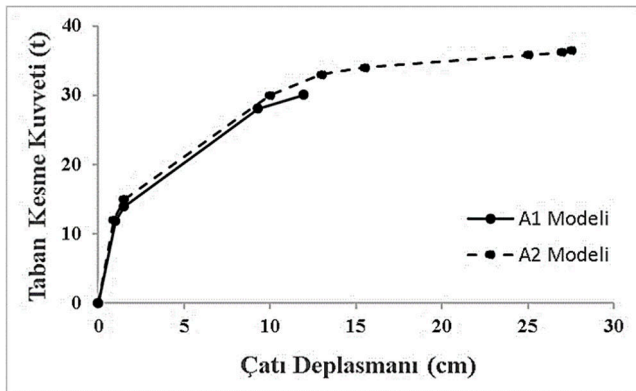


Şekil 13. A2 ve B2 Modeli Performans eğrileri

Tablo 8. A2 ve B2 Modeli Performans Değerleri

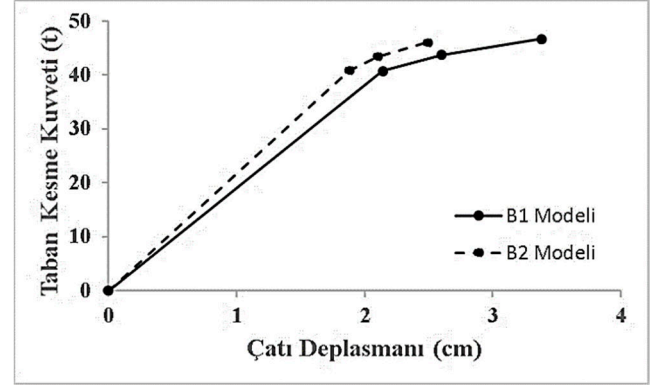
	Elastik sınır (cm)	Taban kesme kuvveti (ton)	Plastik sınır (cm)	Taban kesme kuvveti (ton)
A2	0.9	12.02	27.53	36.39
B2	1.88	40.86	2.49	46.02

A1 ve A2 modelleri kıyaslandığında; her iki modelin aynı merkezi çelik çaprazlı perde sistemi ile elastik limit değerlerinin yaklaşık eşit olduğu ancak plastik limit değerlerinde düzensiz yapı sistemi için ciddi artışlar olduğu gözlenmiştir. Düzensiz yapı daha fazla enerji sönümlenme kapasitesine sahiptir (Şekil 14).



Şekil 14. A1 ve A2 Modeli Performans eğrileri

B1 ve B2 modellerinin elastic ve plastic sınır değerleri incelendiğinde ise değerlerin her iki bölge için yaklaşık eşit olduğu ifade edilebilir.



Şekil 15. B1 ve B2 Modeli Performans Eğrileri

A1-A2 ve B1-B2 kıyaslarından yola çıkarak merkezi çelik çaprazlı perde sistemlerinden diyagonal perde sisteminin yapının enerji sönümlenme kapasitesinde ciddi artışlar sağladığı ifade edilebilir.

4.1. Öneriler

Çalışma, daha farklı olarak tasarlanmış olan düzenli düzensiz yapılar, farklı enkesite ve yönetmeliklerin ön gördüğü şekle sahip çelik çapraz perde sistemleri ele alınarak genişletilebilir.

5. TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde, yaptığı çalışma ile yardımcı olan Berker Alıcıoğlu'na teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Korkmaz A., Ay Z., Çelik D., (2008). Merkezi ve Dışmerkezi Çaprazlarla Güçlendirilen Çelik Binaların Doğrusal Olmayan Davranış, Teknoloji, Cilt 11(2), Syf.105-120.
- [2] Korkmaz A., Ay Z., Çelik D., (2008). Investigation of Inelastic Behaviour Concentric and Eccentric Braced Steel Building Type Structures", Eurosteel, Graz, Austria.
- [3] Uzgider E., Çağlayan, B.Ö., (2005). Depreme Dayanıklı Çelik Yapılar. Türk Yapısal Çelik Derneği, Alp Ofset, İstanbul, Teknik Yayınlar Dizisi 1, 58s.
- [4] Bakır Ş., (2006). Evaluation Of Seismic Response Modification Factors For Steel Frames By Non-Linear Analysis, A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied

Sciences Of Middle East Technical University
November, 2006.

[5] Şen G., (2006). Çok Katlı Çelik Yapılarda Performansa Dayalı Tasarım Kriterleri, İstanbul, 2006.

[6] Korkmaz K.A., Ay Z., Çelik D., (2008) Merkezi Çaprazlı Çelik Yapıların Deprem Davranışlarının İncelenmesi , Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi, Sigma Vol./Cilt 26 Issue/Sayı 1,

[7] Çelik İ.D., Ay Z., (2012), Dışmerkez Çelik Çapraz Perde Bir Sistemde Bağ Kirişi Boyunun 2007 Türk Deprem Yönetmeliği Açısından İncelenmesi, İMO Teknik Dergi, s.5827-5843, Yazı 372

[8] Korkmaz K. A., Ay Z., Çarhoğlu A. I., Çelik D., Nuhoglu A., (2013). Planda Düzensizlikleri Olan Çelik Yapıların Güçlendirilme Tiplerinin Değerlendirilmesi, GÜFBED / GUSTIJ, Volume 3(2), page 29-39.

[9] Kılıç S., (2015). Merkezi Çaprazlı Ve Moment Aktaran Çerçevesi Karma Sistemlerde% 25 Kuralının İncelenmesi, Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.

[10] Türk B. (2016). Merkezi Çelik Çaprazlı Çerçeve Taşıyıcı Sistemin Tasarım Kurallarının Ve Performansının Değerlendirilmesi, Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü, İTÜ.

[11] Türker K., Lekesiz İ., (2017), Tipik Bir Çelik Endüstri Yapısında Çaprazlı Perde Tipinin Deprem Performansına Etkisi, Dokuz Eylül University-Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering Volume 19, Issue 57, September DOI: 10.21205/deufmd.2017195772

[12] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, (2007).

[13] Yahmi D., Branci T., Bouchaïr A., Fournely E., (2017), Evaluation of behaviour factors of steel moment-resisting frames using standard pushover method, Procedia Engineering, Volume 199, Pages 397-403,

[14] Elghazouli A.Y., (2010), Assessment of European seismic design procedures for steel framed structures, Bulletin of Earthquake Engineering., Volume 8, pp. 65-89

[15] Kutanis M., (2011). Performansa Dayalı Tasarım ve Değerlendirme Yöntemlerinin Deprem Sonrası Türkiye’de Gözlenen Yapı Performansları ile Karşılaştırılarak Geliştirilmesi, TÜBİTAK Proje No, 108M303, Sakarya.

[16] Çelik, D., (2008). Merkezi ve Dışmerkezli Güçlendirilmiş Çelik Uzay Çerçevelerin Sismik Performansı. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, Yüksek Lisans Tezi, 73s.

[17] M. Ferraioli, A. Lavino, A. Mandara, (2014), Behaviour factor of code-designed steel moment-resisting frames, International Journal of Steel Structures., Volume 14, pp. 243-254

[18] Alıcıoğlu, B., (2011). Merkezi Çelik Çaprazlı Yapılarda Uygun Çapraz Kesiti ve Geometrisinin ve Çapraz Türünün Belirlenmesi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi



[19] Chan S.L., Chui P.P.T., (2000). Non-Linear Static and Cyclic Analysis of Steel Frames with Semi-Rigid Connections, Elsevier.

[20] B. ANSI , (2005), AISC 360-05-Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, AISC

[21] SAP2000, (2010), Linear and nonlinear static and dynamic analysis of three-dimensional structures, Advanced Version 14.0, Analysis Ref. Manual, Computer and Structures, Berkeley, CA.

[22] FEMA 356, (2000), Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington,.

[23] EN 1993-1, Eurocode 3: (2005), Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, CEN.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 16-03-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 04-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.298476	

Yeni bir tip fren balata test cihazının geliştirilmesi

Hasan Öktem^{*1}, İlyas Uygur², Uğur Yücel¹

ÖZ

Otomotiv sanayindeki gelişmelere paralel olarak sürtünme katsayısı yüksek ve aşınmaya dayanıklı asbestsiz fren balataları üretilmektedir. Üretilen bu balataların aşınma, sürtünme ve gürültü seviyelerinin belirlenmesi için çok sayıda cihazlar geliştirilmiştir. Bu çalışmada, doğal tozlarla üretilen balataların sürtünme karakteristiği SAE J-661 standardına göre test edilmiştir. Bu amaç için bilgisayarlı yeni tip fren balata sürtünme test cihazı tasarlanarak üretilmiştir. Bu fren test cihazı; hidrolik kontrol, mekanik tasarım ve otomasyon sistemlerinden oluşmaktadır. Geliştirilen sürtünme test cihazı diğer sistemlerden ayıran en önemli fark, gerçek ortam şartlarında kullanılan balata numunelerini çok yüksek hassasiyette test edebilen ve gürültü seviyesini ölçebilen bir sistem olmasıdır. Çalışma sonunda, gerçek balata numunelerinin sürtünme katsayısını en kısa sürede ve yüksek doğrulukta tespit eden yeni bir tip balata test cihazının geliştirilmesi sağlanmıştır. Disk devir sayısının artmasıyla, sürtünme katsayısının başlangıçta hızlı bir artış sergilediği, daha sonra azalmaya başlayarak sabit olarak devam ettiği görülmüştür. Bu sonucun, tamamen balata numunesinin yüzey teması ve iki ara yüzey direnci ile ilgili olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Fren Balata, Otomasyon Sistemi, Sürtünme, Fren Balata Test Cihazı

Development of a new type brake pad friction tester

ABSTRACT

An improvement in automotive industry; high coefficient of friction and wear resistance-non asbestos friction pads can be produced. Various types of test apparatus are constructed for wear, friction and noise level detection. In this study, natural dust reinforced brake pads were tested and characterized by SAEJ-661 standards. For this purpose computer aided new type of brake pad friction tester produced. This test machine consists of hydraulic control, mechanical design, and automation systems. The main difference of this new type of tester compared to other is that brake pads can be tested in real dimension and test conditions with high precision. Also noise levels can be measured by the test machine. At the end of the study, real brake pad friction responses can be determined with fast and high precision by newly developed friction pad tester. The friction coefficient is increased rapidly at the beginning with the disc speed increased and the started to decrease and then continued constantly. From this, it is concluded that the whole brake pad pattern is related to surface contact and two interface resistances.

Keywords: Brake pad, Automation system, Friction, Brake pad tester

* Corresponding Author

¹ Doç. Dr. Hasan Öktem, hoktem@kocaeli.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

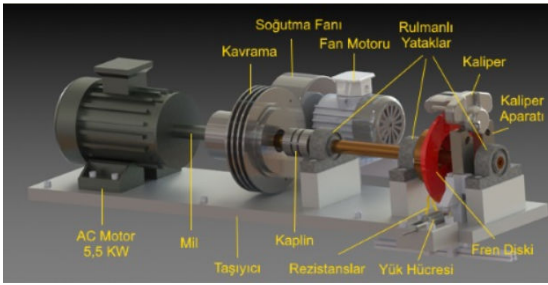
Günümüzde trafik kazalarının birçoğunun araçların fren sistemlerindeki problemlerden kaynaklandığı yapılan inceleme ve bilimsel araştırmalar sonucunda tespit edilmiştir. Özellikle fren sistemlerinde yer alan ve sürtünme malzemelerinden yapılan balatalar, araçlarda sürüş emniyetini sağlamada aracın frenleme performansına etki eden en önemli parçalardır [1]. Bu bakımdan araç fren balataları, olumsuz şartlar altında güvenlik, konfor, dayanım, uygun sürtünme, az malzeme kaybı ve sessiz çalışma gibi özellikler açısından yüksek performans göstermelidir [2-3]. Otomotiv fren balatalarının sürtünme katsayısı ve aşınma miktarının belirlenmesinde, beş farklı test yöntemi bulunmaktadır. Bunlar; araç yol testleri (vehicle road tests), araç kayıcı-pad tests, atalet dinamometreleri (inertial dynamometers) ve laboratuvar tribometreleridir (laboratory tribometers). Bunlar arasında da, laboratuvar tipi sürtünme cihazlarıyla yapılan test yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Laboratuvar tipi sürtünme test cihazları ise dört tiptir: Sürtünme Değerlendirme ve and Gözleme Testi (SDGT), the chase type machines, pin-on-disc tribometers and inertial dynamometers (ECE R-90 standard test) [4-6]. Birçok araştırmacı, doğal ve metal tozlarla farklı içeriklerde üretmiş oldukları otomotiv fren balatalarının aşınma ve sürtünme karakteristiğini tespit edebilmek için laboratuvar tipi cihazları kullanırken, bazı araştırmacılar ise daha basit ve numune tipi balatalar için özel tasarlanmış sürtünme cihazlarıyla test yapmışlardır. Qui et al. [7], Bahari et al. [8], Saffar et al. [9] and Matejka et al. [10], asbestsiz çevre dostu fren balatalarının aşınma ve sürtünme performansını incelemişlerdir. Hazırlanan balataların aşınma ve sürtünme özellikleri, chase tipi cihazda test edilmiştir. Bu cihazda, SAE-661J'de tavsiye edilen standartlara göre testler yapılarak sürtünme katsayısı ve aşınma miktarları elde edilmiştir. Diğer taraftan; bazı araştırmacılar da [11-12], FAST type sürtünme cihazlarıyla fren balata testleri yaparak, aşınma ve sürtünme karakteristiğini incelemişlerdir. Bu cihazlarda, özellikle numune tipi balataların testleri gerçekleştirilmiştir. Tayeb ve diğerleri [13], Kim ve diğerleri [14] ile Liew ve diğerleri [15], fren balata malzemelerinden küçük boyutlarda elde edilen numuneler üzerinde pin-on-disk tipi tribometrelerle, sürtünme katsayısı ve ağırlık kaybına bağlı olarak aşınma oranının belirlendiği çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu tip

cihazlar, abrazif bir cismin karşıt malzemeyi daha önceden belirlenen bir yola göre aşındırması esasına dayalı olarak geliştirilmişlerdir. Satapathy et al. [16], Kumar et al. [17], Kim et al. [18] and Jang [19] çalışmalarında, fren dinamometreleri adı verilen cihazlarla sürtünme testleri gerçekleştirmişlerdir. Fren dinamometreleri, daha çok Krauss tipi cihazlar olarak adlandırılan çok gelişmiş cihazlardır. Diğer sürtünme test cihazlarına göre, aşınma, sürtünme katsayısı ve frenleme kuvvetinin yanında frenleme torkunu da ölçen cihazlardır. Bu cihazlar, bir aracın tek bir tekerindeki yükü ağırlık volanları vasıtasıyla sağlayarak daha hassas ve güvenilir sürtünme katsayısı değerleri verirler. Ancak, bu cihazların üretim maliyetleri çok yüksek ve tasarımları daha karmaşık olduğu için kullanımları daha sınırlıdır. Domaç [20], Koç [21], Karaoğlu [22], Timur [23], Mutlu [24], Kumar [25] ve Kim [26] çalışmalarında, ürettikleri numune boyutlu balataların aşınma ve sürtünme testlerini gerçekleştirmek için uluslararası normlara (SAE-J661 and ECE R-90) uygun olarak çalışan özel tip test düzenekleri geliştirilmişlerdir. Araştırmacıların geliştirmiş oldukları düzenekler, bilgisayar kontrollü olup ve hidrolik tahrik sistemiyle frenleme basıncını sağlayarak test verilerini toplamaktadır. Araştırmacılar çalışmalarında, gerçek fren balata boyutları yerine numune boyutlarını kullanarak test yapmışlardır. Bu test düzenekleri, diğer sürtünme test cihazlarına göre daha basit ve daha az parçadan oluşmaktadır. Dolayısıyla, bu cihazların maliyeti diğer cihazlara göre daha düşüktür. Bahsedilen çalışmalar incelendiğinde, fren balatalarının test edilmesi için geliştirilmiş düzenekler ve standart cihazlarla istenilen aşınma-sürtünme değerleri elde edilmiştir. Aynı zamanda, bu düzenekler ve cihazların birçoğu benzer işlevleri yerine getirerek aşınma ve sürtünme sonuçlarının elde edilmesine olanak vermişlerdir. Bu sebeplerden dolayı, mevcut sürtünme test düzenekleri ve cihazlarının hızla gelişen otomotiv balata sektörüne uyum sağlaması için geliştirilmeleri gerekmektedir. Bu çalışmada, fren balatalarının sürtünme davranışı, geliştirilen yeni bir tip fren balata test düzeneğinde incelenmiştir. Fren balata test düzeneğinin literatürde ve endüstride bulunan diğer düzeneklerden üstünlüğü, daha ucuz olması, daha hassas ve güvenilir sonuçlar verebilmesi, gerçek balataların test edilebilmesi ve yukarıda ifade edilen eksikliklerin tamamen ortadan kaldırılmasıdır

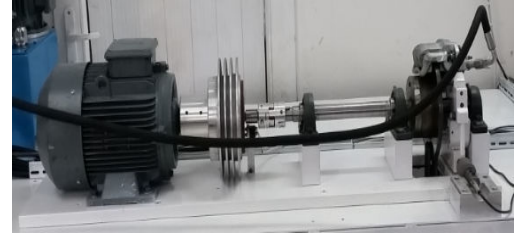
2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL WORK)

2.1. Fren balata test düzeneğinin çalışma prensibi (Working principle of Brake Pad Tester)

Fren balata deney düzeneği, balataların otomobil üzerinde maruz kaldığı gerçek aşınma ve sürtünme koşullarına göre tasarlanmıştır. Test düzeneği sırasıyla bir hidrolik ünite, 5.5 kW-1440 dev/dak dönen elektrik motoru, elektro-mekanik kavrama, ana mil, rulmanlı yataklar, ısıtıcı rezistanslar, fanlı soğutma sistemi, fren disk (d=240 mm), kaliper, kaliper bağlama ve döndürme aparatı, çelik takozlar, çelik masa, çelik alt plaka, yük hücresi, otomasyon kontrol ünitesi, infrared sensör ve interaktif kontrol sağlayan bir bilgisayardan oluşmaktadır. Bunlardan hidrolik ünite üzerinde bulunan oransal valf aracılığıyla, kalipere bağlanan balatalara etki edecek baskı kuvveti ayarlanmaktadır. Elektrik motoru, milde bulunan 44.5 Nm'lik momenti karşılama işlevini yerine getirmektedir. Elektromekanik tozlu tip kavrama, motorun maksimum torkunda sürekli olarak güç aktarımı yapabildiğini sağlamaktadır. Ana mil, rulmanlı yataklar ve kaplin, deney düzeneğinin montajına ve yataklanmasına yardımcı olmaktadır. Fren disk ve kaliper ikilisi, otomobillerde olduğu gibi balataların bağlanmasını, yük hücresi fren disk üzerinde oluşacak sürtünme kuvvetinin ölçülmesini sağlamaktadır. Fren balata test sisteminin tasarım modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 1: Fren balata test cihazının gerçek ve şematik resimleri (The schematic and real pictures of brake pad tester)

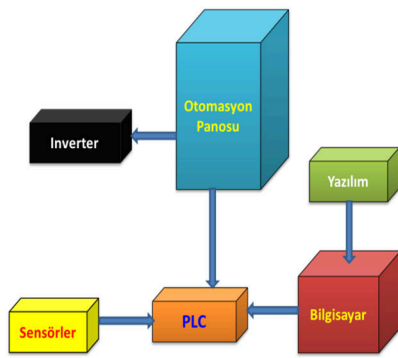
2.1 Hidrolik, mekanik ve otomasyon sistemleri (The systems of hydraulics, mechanic and automation)

Bu çalışmada geliştirilen Fren Balata Test cihazı, birbiriyle eş zamanlı çalışan üç ana sistemin birleşmesinden oluşmuştur. Bu üç sistemin çalışma prensibi aşağıda ayrıntılı olarak açıklanmıştır. **Hidrolik sistem;** basıncı oransal kontrol valfi vasıtasıyla yapılacak testin ihtiyacına göre baskı kuvveti oluşturacak şekilde tasarlanmıştır. Sistem basıncı tamamen PID (Proportional Integral Derivate) kontrol ile belirlenebilmekte olup, oransal basınç kontrol valfi üzerinde set edilen basınç, teorik değil, doğrudan sistemde bulunan hassas basınç algılayıcılarının yaptığı ölçüme göre hattaki basınç kaybından etkilenmeksizin fren pistonuna uygulanan kuvveti ayarlayacak şekilde artırılıp azaltılabilmektedir. Böylece, fren balatalarına uygulanan baskı kuvveti kayıpsız olarak hesaplamalarda kullanılabilir.

Mekanik sistem; geliştirilen yeni tip fren balata test düzeneğinin en önemli bölümlerinde biri de mekanik sistemdir. Bu sistem; motor, elektro-mekanik kavrama, kaplin, rulmanlı yataklar, fren balata tertibatı, yük hücresi, soğutucu fanlar, ısıtıcılar ve bir infrared sensörden oluşmaktadır. Mekanik tasarımda kullanılan elemanlar, aşağıda ifade edilen işlevleri yerine getirmektedir: **Elektro-mekanik kavrama;** elektromekanik tozlu tip kavrama, motorun maksimum torkunda sürekli olarak güç aktarımı yapabildiğini sağlamakta olup, sabit tork değerinde test yapılabilmektedir. **Fren balata Tertibatı;** fren balata test düzeneğine kurulmuş olan hidrolik sistem, balatalara sabit basınç uygulayarak, sistem üzerindeki sensör vasıtasıyla uygulanan kuvvetin gerçek olarak ölçülebilmesini sağlamaktadır. **Yük Hücresi;** balata test sisteminin, tahrik ve ölçüm sistemleri kararlı değerlere sahip olduğundan yük hücresi, benzer test koşullarında doğrusal ve kararlı yük ölçümlerini yaparak PID kontrol

sistemine vermektedir. **Soğutma ünitesi; Fren için;** Disk sıcaklığını test değerlerinde tutmak için fan yardımıyla soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Sıcaklık, sensör tarafından sürekli kontrol edilerek, gerekli durumlarda fanın soğutma işlemini gerçekleştirmesini sağlamaktadır. **Kavrama için;** elektro-manyetik kavrama ile yapılan tork kontrolünde, kavramanın kararlı çalışması sağlamak için bağımsız bir fan ile sürekli soğutma yapılmaktadır. **Isticilar;** fren balata disk sıcaklığını istenilen test değerlerine (100-350°C) çıkartmak için rezistanslar kullanılarak ısıtma işlemi yapılmaktadır. **Isı sensörü;** fren balata diskinin sıcaklığını sürekli kontrol ederek PID kontrol ünitesine bildirmektedir. Bu sayede, test koşulları korunarak kararlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Fren balata test düzeneğini kontrol ve kumanda eden otomasyon sisteminin aşamaları, Şekil 2’de gösterilmiştir. Otomasyon sistemi, inverter, otomasyon panosu, sensörler, PLC (Programlanabilir Logic Kontrol), kontrol yazılımı ve bilgisayar olmak üzere altı ana bileşenden oluşmuştur.

Otomasyon sistemi genel olarak; elektrik motorunun istenilen devir sayılarında dönmesini sağlar ve ana mile hareket ileterek fren diskini döndürür. Aynı zamanda, hidrolik sisteme gerekli komutları göndererek, oransal valf vasıtasıyla istenilen basınçlarda fren diskinin yavaşlatılmasını veya durdurulmasını sağlar. Otomasyon sistemi, ısıtıcı rezistansların çalışmasını ve kritik sıcaklıklarda soğutucu fanın devreye girmesini de sağlar. Tüm bu işlemler, bir PLC ünitesi yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, elde edilen tüm sonuçlar, otomasyon sistemi içinde yer alan bir yazılımla depolanabilmektedir.



Şekil 2: Otomasyon kontrol sistemi akış diyagramı (The flow chart of automation control system)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

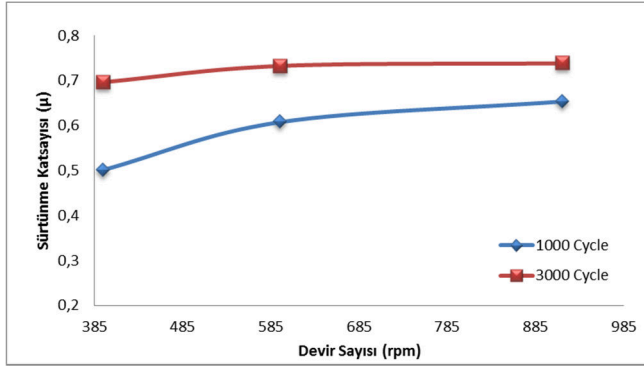
Bu çalışmada yer alan fren balata test cihazı, uluslararası otomobil endüstrisi SAE J661 [20-29] standardı belirtilen şartlar esas alınarak geliştirilmiştir. Ancak, fren balata test cihazının ölçüm doğruluğunu, güvenilirliğini ve performansını belirlemek için farklı koşullar altında (Tablo 1) bir dizi sürtünme deneyi gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen fren balata test cihazı, 0 ile 350 °C arasındaki sıcaklıklarda, tüm testleri yapabilecek kapasitede olmasına rağmen, bu çalışmada yalnızca 0-100 °C arasında değişen sıcaklıklardaki soğuk test sonuçları dikkate alınmıştır. Fren test cihazının doğruluğunu güvenilirliğini tespit etmek için kullanılan frenleme test şartları, Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Frenleme Test Şartları (Braking test conditions)

Test Numarası	Hız (dev/dak)	Basınç (Bar)	Frenleme Sayısı
1	395	10.5	1000
2	595	10.5	1000
3	915	10.5	1000
4	395	30	1000
5	595	30	1000
6	915	30	1000
7	395	10.5	3000
8	595	10.5	3000
9	915	10.5	3000
10	395	30	3000
11	595	30	3000
12	915	30	3000

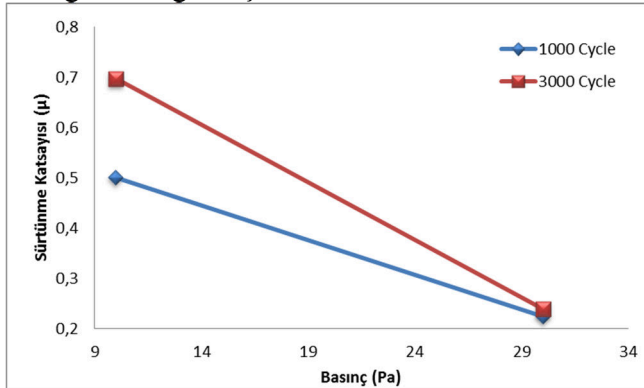
Şekil 3 ve Şekil 4, fren balata test cihazında belirli frenleme sayılarında elde edilen sürtünme katsayısının basınç-devire karşılık değişimini göstermektedir. Şekil 3 incelendiğinde, 1000 ve 3000 frenlemede 585 devire kadar sürtünme katsayısının hızlı bir artış sergilediği, bu noktadan sonra azalmaya başlayarak sabit olarak devam ettiği görülmüştür. Bunun sebebinin, balata ile disk yüzeyi arasında tam bir temas sağlanıncaya kadar, sürtünme katsayısının arttığı, daha sonra azalarak sabit olarak devam etmesidir. Bu durum, SAE-J661’de belirtilen alıştırma deneyi periyodunda açıklanmaktadır. 1000 frenlemede başlangıçtaki sürtünme katsayısı 0.5 μ iken, 3000 frenlemede ise sürtünme katsayısı 0.7 μ ’dir. Bunun temel sebebi, 3000 frenlemede kullanılan balata numunesinin yüzey dokusunun daha pürüzlü olmasıdır. Ayrıca yüksek frenleme miktarı doğal olarak yüzeylerde kısmi aşınmalara ve parçacıkların kopmasına neden olarak yüzey kalitesini bozacaktır. Ancak, her iki frenleme

sonucunda oluşan sürtünme katsayılarının değerleri birbirine yakın olduğu için güvenilirlik açısından herhangi bir problem bulunmamaktadır.



Şekil 3. Fren balatalarının test edilmesi sırasında devir-sürtünme katsayısı değişimi (Variation of speed against friction coefficient in testing brake pads)

Şekil 4 incelendiğinde, 1000 ve 3000 frenlemede sürtünme katsayısının basınçla sürekli olarak azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin de, basınç azaldıkça fren balata kaliperinin piston kuvvetinin azalması ve dolayısıyla balataya nüfuz eden kuvvetin de azalması (normal kuvvetin) sonucunda sürtünme katsayısının artmasıdır. 1000 ve 3000 frenlemedeki başlangıç sürtünme katsayılarının farklı olması, tamamen balata numunesinin yüzey teması ve iki ara yüzey direnci ile ilgili olduğu düşünülebilir.



Şekil 4. Fren balatalarının test edilmesi sırasında basınç-sürtünme katsayısı değişimi (Variation of pressure against friction coefficient in testing brake pads)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, asbestsiz doğal katkılı balata numuneleri, SAE J661 standardına göre geliştirilen yeni bir tip fren balata test cihazında sürtünme testlerine tabi tutulmuştur. Geliştirilen bu cihaz, soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarını, gürültü seviyesini ve aşınma oranını tespit edebilecek kabiliyete sahiptir. Fren balata test cihazının gelişmiş mekanik tasarımı, güçlü

hidrolik ve otomasyon sistemi bu kabiliyetini arttırmıştır. Geliştirilen bu test cihazı, fren balatalarının aşınma direncini geliştirirken, sürtünme katsayısının stabilize edilmesi gibi çok sayıda avantaja sahip olduğunu kanıtlamıştır. Aynı zamanda test cihazı, sürtünme katsayısının ölçülmesinde çok pratik olup, basit bir ekran arayüzüne sahiptir. Böylelikle, testlerde zaman kaybı çok azdır. Test cihazı, bahsedilen bu özelliklerinden dolayı, aynı amaç ve ölçekte üretilen cihazlardan daha üstün ve gelişmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, SAE J661'de tanımlanan otomotiv tipi araçların sürtünme katsayısı değer aralıkları içinde olduğunu göstermiştir. Bu durum, geliştirilen fren balata test cihazının ticari balataların sürtünme katsayısının tespit edilmesinde çok güvenilir ve gerçek koşullara çok yakın veriler elde etmesini mümkün kılmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)



Yazarlar, bu çalışmanın yapılması sırasında destek sağlayan, Yüksek Mühendis Murat ÇEVİK'e teşekkür ederler. Bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar (BAP) tarafından (KOU-BAP-2013/68) nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. Lök, "Araç Fren Sistemleri", Makine Mühendisleri Odası, Kartal, Temmuz, 2011, pp.111-115.
- [2] TS 555, Karayolu Taşıtları-Fren Sistemleri-Balatalar-Sürtünmeli Frenler için, TSE Standartı, Ankara, 1992.
- [3] B. Bhushan, *Principles of Tribology*. Modern Tribology Handbook,1, CRC Press., 2001, pp. 100-110.
- [4] G.W. Stachowiak, A.W. Batchelor, *Engineering Tribology*, Heinemann, Boston,1, , 2001, pp.36-44.
- [5] M. Eriksson, F. Bergman, S Jacobson, (2002), "On the Nature of Tribological Contact in Automotive Brakes", *Wear*, vol.252, pp.26-36.
- [6] M. Eriksson, S. Jacobson, (2000), "Tribological Surfaces of Organic Brake Pads", *Tribology International*, vol.33, pp. 817-827.

- [7] P.J. Blau, Compositions, Functions, and Testing of Friction Brake Materials and Their Additives, Metals and Ceramics Division, U.S. Department of Energy and Oak Ridge National Laboratory, August 2001.
- [8] İ. Satır, "Asbestsiz Fren Balatalarının Kuru ve Yaş Sürtünme Davranışlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2006.
- [9] B. Çiftçi, "Fren Balatalarında Cam Elyaf Kullanımının Sürtünme Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2010.
- [10] A. Kurt, M. Boz, (2007), "The Effect of Al₂O₃ on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials". *Tribology International*, vol.40, pp.1161-1169.
- [11] H. Jang, S.J. Kim, (2000), "The Effects of Antimony Trisulfide (Sb₂S₃) and Zirconium Silicate (Zr₂SiO₄) in the Automotive Brake Friction Material on Friction Characteristics", *Wear*, pp.229-236.
- [12] L.G. Hoyer, A. Bach, G.T. Nielsen, P. Morgen, (1999), "Tribological Properties of Automotive Disc Brakes with Solid Lubricants", *Wear*, vol.232, pp.168-175.
- [13] K.W. Hee, P. Filip, (2005), "Performance Of Ceramic Enhanced Phenolic Matrix Brake Lining Materials for Automotive Brake Linings", *Wear*, vol.259, pp.1088-1096.
- [14] N.S.M. El-Tayeb, Liew K.W, (2009), "On the Dry and Wet Sliding Performance of Potentially New Frictional Brake Pad Materials for Automotive Industry", *Wear*, vol.266, pp. 275-287.
- [15] Y. Hando, T. Kato, (1996), "Effects of Cu Powder, BaSO₄ and Cashew Dust on the Wear and Friction Characteristic of Automotive Brake Pads", *Tribology Transactions*, vol. 39, pp.346-353.
- [16] G.S. Domaç, Disk Frenlerin Tasarım ve Tribolojik Açından İncelenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [17] S. Qi, Z. Fu, Z. Yun, S. Jiang, X. Zheng, Y. Lu, (Jan, 2014), "Effects of Walnut Shells on Friction and Wear Performance of Eco-friendly Brake Friction Composites, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers", *Part J: Journal of Engineering Tribology*, <http://pij.sagepub.com/content/early/2014/01/03/1350650113517112>.
- [18] Y. Ma, S. Shen, J. Tong, W. Ye, Y. Yang, J. Zhou, (2012), "Effects of Bamboo Fibers on Friction Performance of Friction Materials", *J. of Thermo Plastic Composite Materials*, pp.1-15.
- [19] R. Koç, "Bilgisayar Kontrollü Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve İmalatı", *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, 2010, pp.550-560.
- [20] Y. Karaoğlu, Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2006.
- [21] M. Timur, Otomotivde Kullanılan Sürtünme Malzemelerinin Sürtünme Katsayını Tespit eden Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Fen bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2007.
- [22] H. Jang J.S. Lee, J.W. Fash, (2001), "Compositional Effects of the Brake Friction Material on Creep Groan Phenomena", *Wear*, vol. 251, pp. 1477-1483.
- [23] İ. Mutlu, C. Öner, R. Koç, (2005), "Cam Elyaf Katkılı Disk Fren Balatalarında Zaman-Sıcaklık-Sürtünme Katsayısı İlişkisinin İncelenmesi". *Teknoloji*, vol. 8, 1, pp.101-106.
- [24] F. Kara, R. Kara, İ. Mutlu, Fren Balatasında Karbon Elyaf Boyutunun Sürtünme Katsayısına Etkisi, *6. İleri Teknolojiler Sempozyumu*, IATS' 2011, 16-18 Mayıs 2011, Elazığ, Turkey.
- [25] M. Kumar, J. Bijwe, (2010), "Studies on Reduced Scale Tribometer to Investigate the Effects of Metal Additives On Friction Coefficient-Temperature Sensitivity in Brake Materials", *Wear*, vol.269, pp.838-846.
- [26] S.S. Kim, H.J. Hwang, M.W. Shin, H. Jang, (2011), "Friction And Vibration of Automotive Brake Pads Containing Different Abrasive Particles", *Wear*, vol. 271, pp. 1194-1202.
- [27] C. Sarkar, H. Hirani, (2015), "Frictional Characteristics of Brake Pads using Inertia Brake Dynamometer," *International Journal of Current Engineering and Technology*, vol. 5, pp. 981-989.

- [28] T. Singh, A. Patnaik, R. Chauhan, (2016), "Optimization of Tribological Properties of Cement Kiln Dust-filled Brake Pad Using Grey Relation Analysis," *Materials & Design*, vol. 89, pp. 1335-1342.
- [29] Mazza, L, Trivella, A, Grassi, R, Malucelli, G, (2015), "A Comparison of The Relative Friction And Wear Responses of PTFE And A PTFE-Based Composite when Tested Using Three Different Types of Sliding Wear Machines", *Tribology International*, vol.90, pp.15-21.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 17-11-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 06-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.355049	

Ramor 500 zırh çeliğinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde gerilimin etkisi

Semih Taşkaya^{1*}, Tülay Yıldız², Ali Kaya Gür³

ÖZ

Bu çalışmada, Ramor 500 zırh çeliği çifti tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Birleştirme işleminde Cr, Ni ve Mn esaslı östenitik ilave tel kullanılmıştır. Kaynak işlemi sonrası numunelere radyografik muayene yapılmıştır. Kaynak dikiş geometrileri ölçülmüş ve mikrosertlik dağılımları incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, kaynaklı numunelerin birleşme noktalarında gerilim arttıkça dikiş geometri form ölçüleri artmıştır. Birleştirilen bu numunelerin çekme dayanımı testleri ile birleşme mukavemetleri, X-Ray kırınımı yöntemi ile radyografi testleri incelenmiştir. Gerilime bağlı olarak mikrosertlik değerleri birbirine yakın sonuçlar göstermiştir. Sertliğin ITAB bölgesinde azaldığı ve kaynak metalinde yüksek artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tozaltı Kaynağı, Ramor 500, Gerilim.

the effect of voltage on joining of Ramor 500 armor steel with submerged arc welding method

ABSTRACT

In this study, the Ramor 500 armor steel pair was combined with the submerged welding method. Cr, Ni and Mn based austenitic additive wire was used in the joining process. Radiographic examination was performed on the samples after welding. Weld metal geometries were measured and microhardness distributions were investigated. As a result of, the suture geometry form measures increased as the voltage increased at the joining points of the welded samples. While the welding strength of these welded specimens was examined by using tensile strength tests, the radiography test of these specimens was examined by using X-ray diffraction method. Depending on the stress, microhardness values showed similar results. It has been observed that your hardness has decreased in the ITAB region and has increased strongly in the welding metal.

Keywords: Submerged Welding, Ramor 500, Voltage.

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ- muh.semihtaskaya@gmail.com

² Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ- tyildiz@firat.edu.tr

³ Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ- akgur@firat.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ramor zırh çelikleri, herhangi bir patlamadan ve silahla saldırıdan korunmak için üretilmiştir. Buna ek olarak, Ramor çeliklerinin sertliği ve sağlamlığı nedeniyle mükemmel balistik özellikleri vardır. Ramor çeliklerinin, Ramor 400, Ramor 450, Ramor 500, Ramor 550 gibi tipleri vardır. Bu numaralar HBW sertlik değerlerini göstermektedir. Ramor 400 ve Ramor 450, patlamaya dayanan basınca karşı üretilir. Öte yandan, Ramor 500 ve Ramor 550 yüksek hız darbeleri için üretilmektedir [1].

Kullanım amacı olarak bir zırh çeliğinin patlayıcı ve delicilere karşı dirençli olması gerekir. Bu özelliği karşılayabilmesi için mukavemet ve sertlik değerlerinin yüksek olması istenir. HBW 600 değerinin üzerindeki sertlik değerleri çeliğe kırılabilirlik özelliği kazandıracığından, zırh çeliği üzerine gelen darbelere karşı kırılabilir davranış gösterecektir. Zırh çeliklerinde kimyasal kompozisyon; su verme, temperleme ve östenitleştirme gibi ısıl işlemleri çok büyük önem arz etmektedir [2].

Amerika Kaynak Birliği (AWS) tozaltı ark kaynağını şöyle tanımlar. “Tozaltı kaynak yöntemi, iş parçası ile metal tel elektrot / elektrotlar arasında, bir ark / arklar oluşturarak bunların ısıtılmasını sağlayan ve bu suretle birleşmelerini temin eden bir ark kaynağı prosesidir. Ark ve erimiş metal tanecikli yapıya sahip bir toz örtüsü ile korunur. Basınç kullanılmaz. Dolgu metali, elektrot / elektrotlar ile toz ve metal taneciklerinden elde edilir” [3].

Tozaltı kaynak yöntemi yüksek erime gücüne ve kaynak hızına sahip olmakla birlikte çeşitli türden çeliklerin kaynağı için de çok uygun olan bu yöntem kazan, profil, gemi ve basınçlı kap üretimi ile dolgu kaynağı işlemlerinde yoğun bir biçimde kullanılmaktadır [4].

X-Ray tüpleri ve Gamma-Ray izotoplarıyla her çeşit kaynak dikişinin, döküm, dövme parçaların ve imalat sanayinin röntgenlerinin çekilmesi ve belgelenmesi mümkündür. Radyografi yönteminde nüfuz edici kısa boylu radyasyon dalgaları kullanılır. Kontrol edilecek olan malzeme içindeki yoğunluk farkları sayesinde hata tespitleri yapılır. Malzeme üzerine gönderilen ışın genellikle film

üzerine yansıtılır. Malzeme içindeki yapı bozuklukları ve süreksizlikler nedeniyle farklı miktarda soğurulan ışınların yansımalarında farklı

görüntüler oluşur. Gerçekte film üzerine yansıyan görüntü, malzemedeki geçen ışının yarattığı gölge görüntüsüdür [5-12].

Manganello ve Abbot yaptıkları çalışmada, çelik zırhların düşük hız darbe dayanımlarına çelik özelliklerinin etkisini incelemiştir. Çalışma sonunda, balistik başarımları en çok etkileyen özelliğin sertlik olduğunu ortaya koymuşlardır [13]. Zengin E. yaptığı çalışmada, Armour 500 zırh çeliğine elektrik ark kaynağı yöntemi ve elektrodu ile dört farklı ön tav sıcaklığında kaynaklı birleştirme uygulamış ve birleştirme bölgesinin mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Yaptığı deneyler sonucunda, kaynaklı birleştirilen numunelerin hepsinde akma ve çekme dayanımlarının artan ön tav sıcaklığıyla birlikte azaldığı, sünekliliğin ise arttığı sonucuna varmıştır [2]. Chandel ve arkadaşları tozaltı kaynağında akım şiddeti, elektrot polarizasyonu, elektrot çapı ve elektrot uzantısının; dikiş yüksekliği, dikiş genişliği ve nüfuziyet üzerindeki etkisini teorik olarak tahmin eden bir yazılım geliştirmişlerdir. Hem tozaltı kaynağında hem de metal ark kaynağında kaynak dikiş geometrisini tahmin ettikleri bu yazılım, kaynak dikiş geometrisini tahmin etmek için geliştirdikleri algoritmaya dayanır. Ancak bu model plaka üzerinde tane için dikiş geometrisini tahmin etmede kullanılır. Giriş değişkenleri, akım şiddeti, ark gerilimi, kaynak hızı, elektrot çapı, elektrot uzantısı ve elektrot polarizasyonudur [14]. Ping Li ve arkadaşları yapay sinir ağlarını kullanarak, tozaltı kaynak yöntemiyle yapılan bir alın kaynağında dikiş yüksekliği, dikiş genişliği, nüfuziyet, erime ve kep alanları ile akım şiddeti, ark gerilimi ve kaynak hızı arasındaki non-lineer ilişkiyi modellemiştir [15]. Gunaraj ve Murugan boruların tozaltı ark kaynağında dikiş geometrisini tahmin etmek için “Tepki Yüzeyi” metodunun bir uygulamasını geliştirmişlerdir. Çalışmalarında gerilim, tel besleme hızı, kaynak hızı ve torcun iş parçasına uzaklığı giriş değişkeni olarak; nüfuziyet, kep alanı ve dikiş genişliğini ise çıkış değişkenleri olarak göz önüne almışlardır [16].

2. MATERYAL VE METOD (GENERAL REQUIREMENTS)

Çalışmada, Tozaltı kaynağı yöntemiyle Tablo 1’de kimyasal analizi, Tablo 2’de mekanik özellikleri verilmiş olan 65x55 mm uzunluğunda, 3 mm kalınlığında Ramor 500 zırh çeliği malzemesi

kullanılmıştır. Ramor 500 zırh çeliği malzemesi piyasadan temin edilmiştir.

Deneysel çalışmada, Ramor 500 malzemesine uygun Ticari 1 firmasından temin edilen Cr-Ni-Mn esaslı (Tablo 3), (SI-307), 2.40 mm çapında tam östenitik paslanmaz çelik tel ve alümina bazık (AB) karakterli, aglomera esaslı (SF-104) kaynak tozu kullanılmıştır. Özellikle zırh çeliklerinin kaynağında üretici Ticari 2 firmasının önerdiği tam östenitik esaslı kaynak teli tercih edilme sebebi, zırh çeliklerinin kimyasal bileşimlerinden dolayı, yüksek kaliteli derin nüfuziyet ve yüksek kaliteli kaynak dikişi sağlamaktır.

Tablo 1. Ramor 500 zırh çeliğinin kimyasal bileşimi (Chemical Composition of Ramor 500 armor steel) [17]

Kimyasal Bileşim (% Oran)										
Malzeme	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	Fe
Ramor 500	0.32	0.70	1.50	0.015	0.005	1.00	2.00	0.70	0.005	Balans

Tablo 2. Ramor 500 zırh çeliğinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of Ramor 500 armor steel) [17]

Mekanik Özellikler					
Malzeme	Akma Değeri Rp 0,2 (Mpa)	Çekme Dayanımı Rm (Mpa)	Uzama %5	Sertlik (HBW)	Darbe Gücü Charpy (V J)
Ramor 500	1450	1700	7	480-560	20

Tablo 3. Kaynak telinin kimyasal özellikleri (Chemical properties of welding wire) [18]

Kimyasal Bileşim (% Oran)													
Kaynak Teli	Tel Çapı (mm)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	Nb	Fe
SI-307	2.40	0.066	0.4	6.85	0.011	0.003	19.32	8.52	0.06	0.07	0.01	0.01	Balans

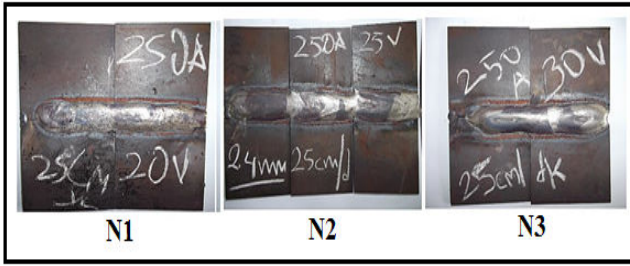
Tozaltı kaynak işlemi öncesinde, Ramor 500 zırh çelik çifti elektrik ark kaynağı ile üst ve alt bölümlerinden, kaynak sırasında numunelerin kaymasını önlemek için, puntalama işlemi yapılmış ve malzeme çiftleri sabitlenmiştir. Birleştirme işleminde akım gücü, nüfuziyetin tam sağlanmasından dolayı 250 A'de sabit tutulmuş, 25 cm/dk sabit tel ilerleme hızında, 20, 25, 30 volt gerilimlerinde kaynak işlemi yapılmıştır. Numunelere ait kaynak parametreleri Tablo 4'de verilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerin kaynak işlemi öncesi ve sonrası resimleri Şekil 1'de, makro resimleri ise Şekil 2'de gösterilmiştir.

Numune Adı	Kaynak Gücü (Amper)	İlerleme Hızı (cm/ dk)	Gerilim (Volt)
N1			20
N2	250	25	25
N3			30

Tablo 4. Kaynak parametreleri (Source parameters)



Şekil 1. Ramor 500 malzeme çiftlerinin tozaltı kaynağı sırasındaki resimleri (Images of Ramor 500 material pairs on the side of the underwater source)



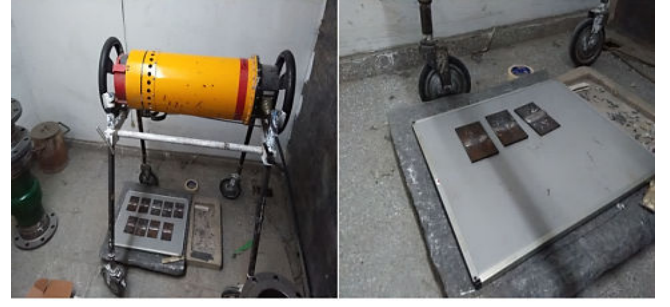
Şekil 2. Kaynaklı birleştirmelerin makro resimleri (Macro images of welded assemblies)

Aynı parametrelerden 2 ve 3 parça Ramor 500 malzeme çifti birleştirilmiştir. Kaynaklı birleştirmelerden en yüksek kaliteli tam nüfuziyet sağlayan kaynak dikişleri seçilerek (Şekil 2), diğer malzeme çiftlerinden spiral ile birbirinden ayırma işlemi uygulanmıştır. Şekil 3'de numunelerin kaynak ön ve arka dikiş makro resimleri gösterilmiştir.

Tozaltı kaynak yöntemi ile kaynakları yapılan numunelere, kaynak dikişindeki iç hataların görülmesi için tahribatsız muayene yöntemlerinden olan Radyografik Muayene uygulanmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. Kaynaklı birleştirmelerin ön ve arka dikiş makro resimleri (Front and rear stitch macro images of welded joints)

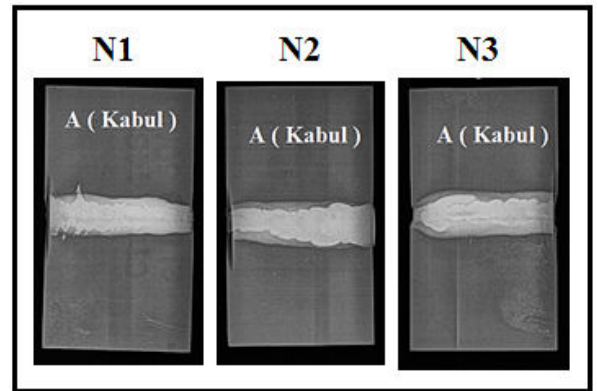


Şekil 4. Röntgen çekimi için hazırlanan numuneler (Samples prepared for X-ray)

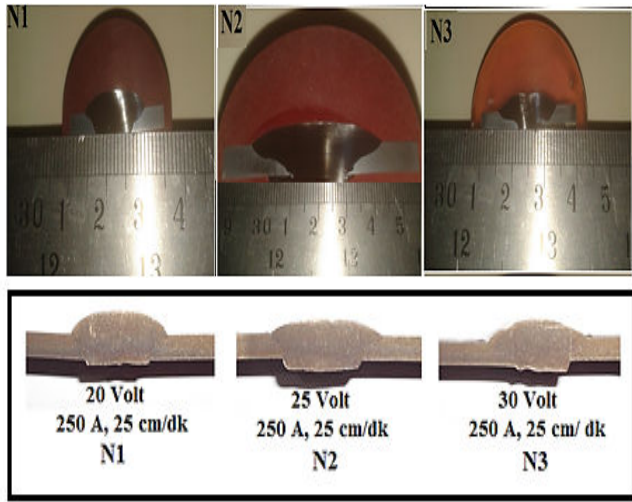
İşinleme işlemi bittikten sonra filmler banyo edilmiştir.

3. BULGULAR VE İRDELEME (RESULTS AND DISCUSSION)

250 sabit amperde, 25 cm/dk sabit kaynak tel ilerleme hızında 20, 25, 30 volt gerilimlerinde birleştirilen N1, N2 ve N3 numunelerinde herhangi bir kaynak hatası gözlemlenmemiştir ve A (Kabul) raporu verilmiştir (Şekil 5). Bu rapor sonucu, uluslararası kaynak enstitüsünün yayınladığı ilkelere göre verilmiştir [10-12]. Kaynak gerilimine bağlı kaynak dikiş geometrilerinin ölçüm değerleri Tablo 5 ve grafiksel analizi Şekil 6'de kaynak dikiş geometrisi makroları, Şekil 7'de ise kaynak dikiş geometrisi grafiksel analizi verilmiştir. Resimler incelendiğinde kaynak dikişinin, birleştirilen Ramor 500 çelik çiftinin birleşme ara yüzeyinde olduğu görülmektedir. Sabit amper ve ilerleme hızında, gerilim arttıkça buna paralel olarak kaynak dikiş genişliği, yüksekliği ve derinliği görülebilmektedir. 250 sabit amperde bütün numunelerde nüfuziyetin tam sağlandığı görülmektedir. Kaynak dikişi ve ITAB'da herhangi bir çatlığa rastlanmamıştır.



Şekil 5. Kaynak röntgen resimleri (Welding x-ray images)

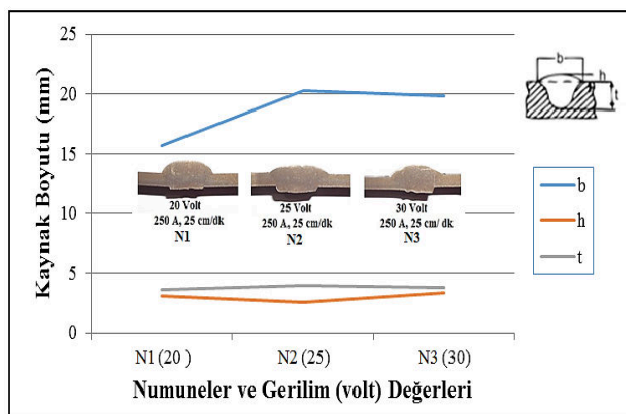


Şekil 6. Kaynak dikiş geometrisi makroları (Welding stitch geometry macros)

Tablo 5. Kaynak dikiş geometrisi ölçümleri (Weld seam geometry measurements)

Kaynak Geometrisi Ölçüm Değerleri			
Numuneler	Dikiş Genişliği (b), (mm)	Dikiş Yüksekliği (h), (mm)	Dikiş Derinliği (t), (mm)
N1	15,7	3,1	3,6
N2	20,25	2,6	3,95
N3	19,8	3,35	3,85

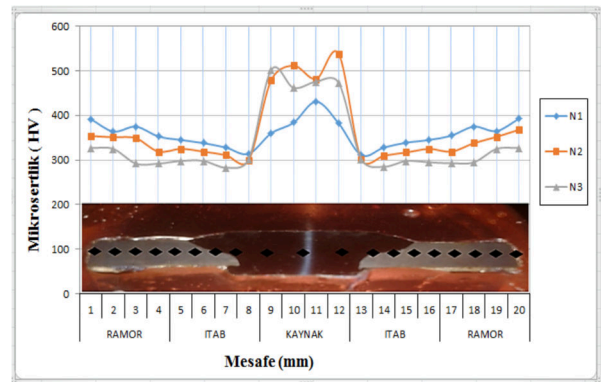
Kaynak dikiş geometrisinde gerilim arttıkça genişlik, yükseklik ve derinlik yaklaşık olarak birbirine yakın değerlerde arttığı görülmüştür. Kaynak dikişinin genişliği ve nüfuziyetin artışı, artan amper ve gerilime bağlı olarak değişmektedir [19].



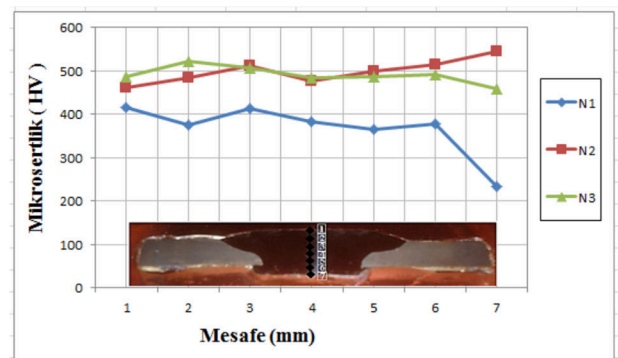
Şekil 7. Kaynak dikiş geometrisi grafiksel analizi (Graphical analysis of weld seam geometry)

Şekil 8 ve 9'da mikrosertlik ölçümleri sonuçlarının tamamında ölçüm sonuçları numunelerden elde ettiğimiz sertlik eğrilerine göre incelendiğinde; kaynak dikişlerinin sertliğinde ana malzemenin sertliğine göre artış gözlenmiştir. Kaynak metalinde sertlik değerlerinin yükseldiği gözlemlenmiştir.

İşlem görmemiş ana malzeme mikrosertlik değeri 480 HV olarak ölçülmüştür. Kaynak işleminden sonra Ramor 500 çelik çiftinin olduğu tarafta sertlikte çeliğin özgül değerine göre azalma, ITAB'da sıcaklığın etkisiyle tane yapısında büyüme, sertlikte azalma ve sonra kaynak metaline doğru artma görülmüştür. Ana malzemedeki sertlik düşüşünün nedeni, kaynak metali dikiş genişliğinin fazla olmasından dolayı, ITAB'ın etkisinde kalan bölgeden ana malzemenin etkilediği düşünülmektedir. Ramor 500 çeliğinde ITAB bölgesinde martenzitik yapının ferrite dönüşmesiyle ferrit taneleri büyür ve büyüme bu bölgede olumsuz etki yapacağından sertlikte düşmeye neden olur [20].



Şekil 8. Kaynaklı numunelerin yatay ekseninden alınan mikrosertlik analizi (Microhardness analysis of welded samples from horizontal axis)



Şekil 9. Kaynaklı numunelerin dikey ekseninden alınan mikrosertlik analizi (Microhardness analysis of welded samples from vertical axis)

Kaynak metalindeki sertlik yükselmesinin sebebinin kaynak havuzunun max. sıcaklığa eriştiği anda ilave östenitik esaslı paslanmaz çelik telin Cr'nin, Ramor 500 içindeki C ile oluşturduğu sert bileşiklerin yada ilave kaynak telindeki alaşım elementlerinin işlem sırasında oluşan ısıdan dolayı meydana gelen yeni sert fazların varlığından olduğu düşünülmektedir. Çünkü östenitik paslanmaz çeliklerin kaynağında bu durum Schaffler diyagramı esas alınarak yapılacak incelemelerde de martenzit oluşumu mikrosertlik değerlerinin yüksek çıkmasında önemli bir etken olarak göze çarpmaktadır [21].

4. SONUÇLAR(CONCLUSION)

Ramor 500 çifti sabit amper ve ilerleme ile farklı voltaj girdisiyle östenitik kaynak teli kullanılarak tozaltı kaynağıyla birleştirilmiştir. Kaynak dikişinde makro ya da mikro çatlğa rastlanmamıştır. Kaynak dikişi profili incelendiğinde yeterli nüfuziyet sağlanmıştır. Mikrosertlik değerleri ITAB' da düşüş, kaynak dikişinde ise artmaktadır. ITAB'daki sertlik düşüşü ferritik tanelerin büyümesi sonucu oluşmuştur [20]. Ana malzemedeki sertlik düşüşü ise, kaynak metalindeki yüksek ısı girdisiyle ITAB'ın etkisi altında kaldığı düşünülmektedir. Kaynak telindeki alaşım elementlerinden dolayı sertlik bir artış göstermiştir. Kaynaklı birleştirmelerin radyografik görüntülerinde herhangi bir kaynak hatası gözlemlenmemiştir ve A (Kabul) raporu uluslararası kaynak enstitüsüne göre [10-12] verilmiştir. Sabit amper ve sabit ilerleme hızında gerilimin artışıyla birlikte kaynak metalinin nüfuziyeti sağlanmıştır. Kaynak dikişinin genişlik yükseklik ve derinliğinde birbirine yakın değerler gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (FÜBAP) birimi tarafından TEKF. 16.24 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)



[1] İ. Memiş, "Impact Response Of Ramor 500 Armor Impact Response Of Ramor 500 Armor Steel Subjected To High Velocities", *Graduate School of Natural and Applied Science of Dokuz Eylül University In Partial Fullfilment of the Requirements for the Master of Science of Mechanical Engineering*,

Mechanic Program, 2016.

- [2] E. Zengin, "Farklı ön tav sıcaklıklarında kaynaklı birleştirilen zırh çeliklerinin mekanik özelliklerinin araştırılması", *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara*, 2010.
- [3] The Miller Electric "MFG. CO.", *The Handbook Of SAW, Rev.*, vol. 11/85, 1982.
- [4] E. Kaluç, "Ergitme Esaslı Kaynak Yöntemleri", *Kaynak Teknolojisi El Kitabı. Cilt 1: Makine Mühendisleri Odası Kocaeli Şubesi*, 2004.
- [5] T. Tekiz, "The Non-destructive Testings", *ITU Faculty of Mechanical Engineering, Istanbul*, 1984.
- [6] M. Albayrak, "The Control and Inspection of the Welding Seams", *IGDAS*, 1997.
- [7] <http://www.ndt-ed.org>
- [8] <http://www.wtndt.metu.edu.tr>
- [9] TS EN 444, *TS EN 462 Standards*, 1994.
- [10] Tülay YILDIZ, Ali Kaya GUR, Fevzi Ataman BİLEN, "The Investigation of Welding Availability Of AISI304-Hardox 400 Steel Couples Welded By Plasma Transferred Arc Welding" *Ciência e Técnica Vitivinícola Journal*, 32 (10), 190-204, 2017.
- [11] Uğur CALIGULU, Mustafa ACIK, Mustafa TURKMEN and Ali Kaya GUR, "Radiography Test of AISI 1010-Copper Alloys Welded by Friction Welding", *SYLWAN*, 160 (4), 468-479, 2016.
- [12] Ali Kaya GUR, Necmettin YIGİTTURK, Tülay YILDIZ; "Examination Of Welding Characteristics Of AISI304-Ramor 500 Steel Couples Welded By Plasma Transferred Arc Welding" *SYLWAN*, 160 (11), 212-225, 2016.
- [13] A. K. Manganello J, "Metallurgical factors affecting the ballistic behavior of steel targets"., *J of Mater JMLSA*, , vol. 17, 231–23, 1972.
- [14] F. L. Chandel, R. S., Seow, H. P. And Cheong, "Effect of increasing deposition rate on the bead geometry of submerged arc welds", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 72, 124–12, 1997.
- [15] J. Ping Li, Fang, M. T. C. And Lucas, "Modelling of submerged arc weld beads using self-adaptive offset neutral networks",

Journal of Materials Processing Technology, vol. 71, 288–29, 1997.

- [16] N. Gunaraj, V. And Murugan, “Application of response surface methodology for predicting weld bead quality in submerged arc welding of pipes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 88, 266–27, 1999.
- [17] <http://www.ssab.com.tr/products/brands/armox/armox-500t>
- [18] <http://www.oerlikon.com.tr>
- [19] C.E.Merzalı, “Zırh Çeliklerinde Kaynak Sonrası Isı Tesiri Altında Kalan Bölgenin Özelliklerinin Isıl İşlem İle İyileştirilmesi”, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D.*, 2013.
- [20] A. Durgutlu, B. Gülenç, K. Tülbentçi, “Ark Kaynağında Kaynak Hızının Nüfuziyete ve Mikroyapıya Etkisi” *Tr. J. of Engineering and Environmental Science*, 23,251-259, 1999.
- [21] N.Yiğittürk, “Ramor Zırh Çeliği İle AISI 304 Paslanmaz Çelik Çiftlerinin Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması”, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği A.B.D., Elazığ*, 2016.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 12-07-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 13-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.328076	

İki boyutlu sığ akım denklemlerinin sırasız ağda sayısal çözümü için bilgisayar yazılımı geliştirilmesi

Nuray Öktem*¹

ÖZ

Bu çalışmada, iki boyutlu Sığ Akım Denklemleri'nin (SAD) sırasız ağ üzerinde sayısal çözümü için özgün bir yazılım geliştirilmiştir. Geliştirilen yazılım bazı ölçüt problemler için koşutularak test edilmiştir. Sayısal yöntem sırasız üçgen bir çözüm ağı üzerinde hücre merkezli sonlu hacim yöntemine dayanmaktadır. Süreklilik ve momentum denklemlerindeki akı hesabı için ikinci derece doğruluklu Ağırlık Ortalamalı Akı (Weighted Average Flux, WAF) yöntemi kullanılmıştır. Sığ akım denklemlerinin en belirgin özelliği su yüzeyinde oluşabilecek şok dalgalarından kaynaklanan süreksizliklerdir. Sayısal yöntemin şok dalgalarını ayrıntılı bir şekilde tanımlayabilmesi ve hücreler arası akı hesabında akı sınırlayıcılarını kullanmaya olanak vermesi için WAF yöntemi HLLC Riemann çözücülerıyla birleştirilmiştir. Ayrıca, ikinci dereceden doğruluklu sayısal çözüm nedeniyle oluşabilecek sayısal salınımları söndürmek için de Toplam Salınım Azaltma (Total Variation Diminishing, TVD) teorisinden faydalanılmıştır. Literatürde sıralı çözüm ağları için mevcut olan ara-yüz akı sınırlayıcı fonksiyonlarının içerdiği rüzgar yönlü değişimlerin yerel değişimlere oranı, sırasız çözüm ağları için ilk kez tanımlanmış ve yeni gradyan yaklaşımlarıyla beraber kullanılabilir hale getirilmiştir. Test sonuçları, sayısal yöntemin ve geliştirilen yazılımın doğru çalıştığını ve gerçek problemlere uygulanabilirliğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: sığ akım denklemleri, sırasız ağ, WAF, HLLC Riemann çözücüsü

Computer code development for the numerical solution of two dimensional shallow flow equations on unstructured grid

ABSTRACT

In this paper a novel computer code is developed for numerical solution of two dimensional shallow flow equations on unstructured grid. The code is tested by running on some benchmark problems. The numerical method is based on a cell centered Finite Volume Method (FVM) applied on an unstructured triangular mesh. Weighted Averaged Flux (WAF) method is used for the computation of the fluxes in continuity and momentum equations. The most prominent property of the shallow flow equations is the discontinuities due to shock waves occurring on the free surface of the flow. Therefore, WAF is combined with HLLC

* Corresponding Author

¹ Ankara Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Natural Sciences, Department of Mathematics, Ankara, nbozkaya@gmail.com

Riemann solvers in order to make the method capable to describe the shock waves and also have the opportunity to use flux limiters in the computation of the interface fluxes. Besides, the Total Variation Diminishing (TVD) theory is utilized for smoothing the oscillations which may occur due to the second order accuracy of the numerical solution. The ratio of the upwind to local variations involved in the interface flux limiter functions available in the literature for the structured grid systems is described here for the first time for the unstructured grids and it is made usable with the new gradient approach. Test results show that the numerical method and the code developed are successful and can be applied to real cases.

Keywords: shallow flow equations, unstructured grid, WAF, HLLC Riemann solver

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda en modern kentler dahi sel felaketlerinde savunmasız kalabilmektedir. İklim değişikliği, nüfus artışı, arazi kullanımında değişim, ormansızlaşma ve taşkın havzalarındaki kentsel yerleşim sel felaketlerinin giderek daha şiddetli ve sık görünmesine sebep olmaktadır. Sel analizlerinin yapılabilmesi için öncelikle taşkın dalgalarının doğal nehir yataklarından nüfus yoğunluğu fazla olan kentsel alanlara kadar farklı karakterdeki arazi üzerinde hidrolik davranışını tanımlayan matematik modellerin oluşturulmasına ve sayısal çözümüne ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun başlıca nedeni laboratuvarlarda kurulan hidrolik modellerin masraflı, vakit alıcı ve duruma özel olmasıdır. Buna karşılık matematik model bir problem için bir kez geliştirildiğinde sadece verilerin değiştirilmesiyle tüm benzer problemlere uygulanabilmektedir. Ayrıca, doğal ortamda daima 3-boyutlu olan akımların 1 veya 2-boyutlu matematik modelinin yapılarak basitleştirilmesi ve böylece pratik ve hızlı çözümler elde edilmesi mümkündür. Taşkın yayılımını modelleyen bu tip 1 veya 2-boyutlu denklemlerin sayısal çözümü için çeşitli yöntem ve bilgisayar programları geliştirilmiştir. Ancak mevcut yazılımların hemen hemen hepsi yabancı kaynaklı olup ticari yazılımlardır. Yerli bir yazılımın olmaması maliyetli olmakla birlikte farklı sayısal ve fiziksel koşullara uyarlamayı da kısıtlayabilmekte ve zorlaştırabilmektedir. Ülkemizde taşkın ilerlemesi üzerine yapılmış sayılı çalışmalardan bazıları [1, 2, 3, 4] ile örneklendirilebilir. Bunlardan çalışma [1]'de mevcut bir bilgisayar programı yardımıyla ve dinamik dalga yönteminin Saint Venant denklemlerine uygulanmasıyla, baraj yıkılması sonrası oluşan taşkın dalgası, 1-boyutlu olarak incelenmiştir. Çalışma [2]'de de 1-boyutlu Saint Venant modeli için mevcut başka bir hazır programın çıktıları kullanılmıştır. Çalışma [3] ise taşkın dalgasının baraj mansabında ilerlemesinin 2-boyutlu ele alındığı ve sıralı bir çözüm ağında

sonlu-farklar yöntemine dayanan mevcut bir yazılımın kullanıldığı en yeni taşkın analiz çalışması olarak gösterilebilir. [4] çalışması incelendiğinde ise araştırmacıların temelde 2-boyutlu sığ akım denklemlerini kullandığı ve kendi özgün yazılımlarıyla elde ettikleri 2-boyutlu SAD sayısal çözümlerinin, gerçekte 3-boyutlu olan hidrolik akımlara uygulanabilirliği üzerine çalıştıkları görülmektedir. Ayrıca sayısal çözümler sıralı çözüm ağında (kare elemanlar) Riemann çözücülerini içeren Godunov sonlu hacim yöntemiyle [5] elde edilmiştir. Bu çalışmada ise taşkın ilerlemesini modelleyen 2-boyutlu derinlik integralli sığ akım denklemlerini karmaşık şekilli ortamlarda sırasız hesap ağı üzerinde sayısal çözen özgün bir bilgisayar yazılımı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan WAF sayısal modeli ve modelin sırasız ağda uygulandığı ve yazılıma aktarılması ayrıntılı olarak işlenmiştir.

İki boyutlu sığ akım denklemleri taşkın analizinin yanı sıra geniş ırmaklar, nehirler, sığ göller ve kıyı bölgelerinin benzetimlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Çünkü SAD denklemleri herhangi bir serbest yüzeyli akım için kullanıldığında sayısal bakımdan önemli avantajlar sağlamaktadır. Kilometrelerce uzayıp giden taşkın alanlarında akım parametrelerinin düşey yöndeki değişimi önemsiz kalacağından denklemler derinlik yönünde integrallenir ve doğrudan derinlik ortalamalı değerler için çözüm yapılır. Böylece çözümün ilk çıktısı süreklilik denkleminde elde edilen su derinliği olacaktır. Ayrıca düşey yönde hidrostatik basınç varsayımı ile de basınç terimi denklemlerden düşürülür ve böylece basınç için ayrıca bir çözüm yapmak gerekmez. SAD denklemlerinin bir diğer önemli özelliği de akımdaki süreksizliklerin sayısal modelde tanımlanmasına izin vermesi ve böylece bu süreksizlik noktaları etrafında sonlu hacim yöntemiyle uyum içinde çalışarak süreksizliklerin düzlenmeden olduğu gibi yakalanmasına olanak sağlamasıdır [5, 6].

Literatürde SAD çözümü için mevcut sayısal yöntemlerden büyük bir çoğunluğu sıralı çözüm ağı üzerinde verilmektedir [[7, 8, 9, 10, 11]. Bu durum özellikle karmaşık akım geometrilerinin modellenmesinde zorluklar doğurmaktadır. Bundan dolayı bu çalışmada üçgen hücrelerden oluşan sırasız bir çözüm ağı [[12, 13, 14, 15] ile çalışılmıştır. Böylece üretilen çözüm kodunun gerçek hayattaki problemlere uygulanabilirliği artırılmıştır. Çözüm alanının üçgen elemanlara bölünmesi, girintili-çıkıntılı sınır bölgelerinin doğru tanımlanmasını kolaylaştırmakta ve sayısal çözümde sınır koşullarının doğru ve yüksek hassasiyetle uygulanmasına olanak vermektedir. Örneğin, eğrilerden oluşan bir köprü ayağını akım alanı içinde doğru tanımlamak kolaylaştığı gibi dikkat gerektiren sınır bölgelerinde de hücre sayısı arttırılabilir.

Denklemlerin doğrusal olmayan hiperbolik yapısı nedeniyle analitik çözüm sadece bazı özel durumlar için mevcuttur [16]. Geçmişte çözüm için Sonlu Fark (Finite Difference) ve Sonlu Eleman (Finite Element) sayısal yöntemlerinden faydalanılmıştır. Ancak sonlu fark yöntemi kütleli korumadığı gibi denklemlerdeki türevlerin sonlu fark yaklaşımları süreksizlik noktalarının komşuluğunda yeterli olmamaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ise kütleli tanım bölgesinin bütününde korur fakat noktasal olarak koruma sağlamaz ayrıca süreksizlik noktalarında da salınımlar içermektedir. Bu nedenlerle son yıllarda ağırlıklı olarak sonlu hacim yöntemi (FVM) ile çözüm aranmaktadır. Sonlu hacim yöntemlerinde, akım bölgesi çözüm ağını oluşturan küçük ‘kontrol hacimleri’ne ayrıştırılmakta ve denklemin bu hacimler üzerinde integrali alınarak, sayısal yaklaşımlar denklemlerin her kontrol hücresindeki integral formu üzerinde uygulanmaktadır. Her bir zaman adımında hücre ara-yüzlerindeki akılar hesaplanır ve sonra değişkenlerin her bir hücre içindeki ortalama değerlerine ulaşılır. Sonlu hacim yöntemleri diğer yöntemlere kıyasla süreksizlik durumunda da hücre ara-yüzlerindeki akıların daha doğru hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Hücreler arası akıların hesaplanmasında, ‘rüzgar yönlü şemalar’ tercih edilmektedir. Bunun başlıca nedeni rüzgar yönlü şemaların ara-yüz hesapları esnasında akım yönünü dikkate alarak daha doğru akı sonuçları vermesindedir. Bu çalışmada da 2-boyutlu sığ akım denklemleri sırasız bir çözüm ağı üzerinde sonlu hacim yöntemi ile HLLC rüzgar yönlü şemalar ve toplam salınım azaltmalı ağırlık ortalamalı akı yönteminin (TVD-WAF) ortak uygulamasıyla çözülmüştür.

2. GENEL DENKLEMLER(GOVERNING EQUATIONS)

Sığ akım denklemleri Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin derinlik üzerinde integralinin alınması ile elde edilir [5]. Denklemler türetilirken su derinliğinin yatay düzlemdeki akım alanına göre daha küçük olduğu (sığ akım teorisi) kabul edilerek, düşey yönde akım ivmesi sıfır alınır. Bu varsayımın bir sonucu olarak düşey yönde basınç dağılımı hidrostatik olacağından basınç için bir çözüme ihtiyaç kalmamaktadır. Süreklilik denklemi ve x - ve y -yönlerinde iki momentum denklemlerinden oluşan sığ akım denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hu^2 + \frac{gh^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) &= -gh\frac{\partial z_b}{\partial x} - ghS_{fx} \\ \frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hv^2 + \frac{gh^2}{2}\right) &= -gh\frac{\partial z_b}{\partial y} - ghS_{fy} \end{aligned} \quad (1)$$

Burada h su yatağından serbest yüzeye kadar olan su derinliği, g yerçekimi ivmesi, u ve v sırasıyla x - ve y -yönlerindeki derinlik integralli hız bileşenleridir. z_b su yatağı derinliği olup türevleri $S_{0x} = -\partial z_b/\partial x$ ve $S_{0y} = -\partial z_b/\partial y$, x - ve y -yönlerindeki yatak eğimlerini gösterir. S_{fx} ve S_{fy} su yatağı sürtünme gerilmeleridir ve n Manning pürüzlülük parametresi olmak üzere

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, \quad S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (2)$$

eşitlikleri ile tanımlanırlar.

$$\begin{aligned} U &= (h, hu, hv)^T \\ E(U) &= \left(hu, hu^2 + \frac{gh^2}{2}, hvu\right)^T \\ G(U) &= \left(hv, huv, hv^2 + \frac{gh^2}{2}\right)^T \\ S_b(U) &= (0, ghS_{0x}, ghS_{0y})^T \\ S_f(U) &= (0, -ghS_{fx}, -ghS_{fy})^T \end{aligned} \quad (3)$$

vektörel ifadelerinde, U bilinmeyenler vektörünü, E ve G viskoz olmayan konvektif akı bileşenlerini, $S(U) = S_b(U) + S_f(U)$ kaynak terimini

göstermek üzere (1) sisteminin toplu vektörel formu

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial E(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U) \quad (4)$$

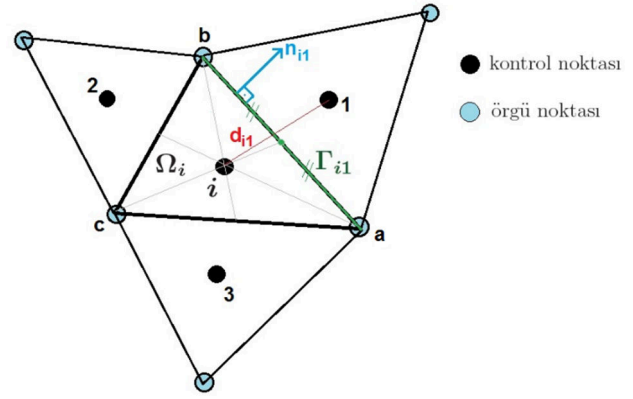
şeklinde yazılabilir.

3. ÜÇGEN ÇÖZÜM ÖRGÜSÜNDE SONLU HACİM YAKLAŞIMI (THE FINITE VOLUME APPROXIMATION ON TRIANGULAR GRID)

Sığ akım denklemleri doğrusal değildir ve $h > 0$ için kesin hiperbolik karakterli olup $h = 0$ durumunda bu hiperbolikliği kaybetmektedir. Bu ise tanım bölgesinde derinliğin yok olarak kuru zemin bölgelerinin belirebildiği anlamına gelmektedir. Bu denklemlerin en önemli özelliği su yüzeyinde oluşabilecek şok dalgalarından dolayı çözümünde süreksizlikler içermesidir. Bu nedenle kullanılacak sayısal çözüm yönteminin bu şok dalgalarını yakalayabilecek ve doğru olarak hesaplayabilecek nitelikte olması gerekir.

Bu çalışmada sığ akım denklemleri sayısal olarak hücre-merkezli sonlu hacim yöntemiyle çözülmektedir. Akım alanı 2-boyutlu yatay düzlemde üçgen elemanlara ayrılarak geometrik ayrıklaştırma yapılır. Akı teriminin hesabında WAF yöntemi kullanılarak düzlemde ikinci dereceden doğruluk elde edilir. Hücreler arası akı hesabı yapılırken HLLC Riemann çözücüsünden faydalanılması çözümün şok dalgalarıyla beraber ara-yüz temas (contact) dalgalarını yakalama özelliğini de destekler.

Şimdi sonlu hacim yöntemlerinin genel bir uygulaması olarak problemin tanım bölgesi, Ω , NT adet sonlu sayıda üçgen bölgeye bölünsün. Üçgenlerden oluşan böyle bir yapısız çözüm ağında bir kontrol hacim elemanı, bu hacim elemanının komşu üçgenleri ve üçgenler arası hücre ara-yüzlerini Şekil 1'de incelemek mümkündür. Ω_i , $i = 1, \dots, NT$ üçgenlerinden her biri kontrol hacim elemanı (sonlu hacim) olarak adlandırılır. Buna göre her bir üçgenin ağırlık merkezi kontrol noktalarıdır. Çözüm örgüsünün elemanları da üçgenlerin köşe noktalarından oluşmaktadır ve sonlu sayıda üçgen için örgü noktalarının sayısı NG ile gösterilmektedir. Her bir kontrol üçgeninin saat yönünün tersine numaralandırılmış 3 komşusu ve ortak eleman olarak paylaştığı 3 ara-yüz bulunmaktadır.



Şekil 1. Sayısal çözüm ağı (Numerical solution grid)

Örneğin i ile 1 kontrol noktalarının (Şekil 1) ortak doğru elemanı Γ_{i1} olup d_{i1} bu iki nokta arasındaki uzaklığı göstermektedir. Kodlama esnasında da her bir üçgenin köşe noktaları (a , b ve c), komşu üçgenleri ($\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$) ve ara-yüz elemanları (Γ_{i1}, Γ_{i2} ve Γ_{i3}) saat yönünün tersine sıralanarak hafızada saklanmıştır. Ayrıca hangi kontrol üçgeni için çalışılıyorsa o üçgenin ara-yüz elemanlarına ait normal vektörlerinin yönlerine dikkat edilmelidir. Γ_{i1} ara-yüz elemanı için belirtilen normal vektörü n_{i1} bu elemana dik ve i kontrol noktası içte kalacak şekilde dışa doğrudur.

Literatürde böyle bir çözüm ağı elde etmek için çeşitli bilgisayar kodları bulunmaktadır. Bu çalışmada Per-Olof Persson ve Gilbert Strang'ın [17] ortak yayınlarında sunmuş oldukları MATLAB çözüm ağı üreticiden faydalanılmıştır. Bu kod geliştirilerek FORTRAN programlama diliyle yazılan yeni ana kod ile uyumlu hale getirilmiş ve böylece çözüm kodunun değişik ve karmaşık geometrilerde kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Sırasız çözüm ağında sonlu hacim yöntemi denklemlere aşağıdaki gibi uygulanır. Bölgenin üçgenlere bölünmesinden sonra her bir Ω_i hücresi üzerinden (4) denkleminin integrali alınır.

$$\int_{\Omega_i} \frac{\partial U}{\partial t} d\Omega_i + \int_{\Omega_i} \nabla \cdot [E(U), G(U)] d\Omega_i = \int_{\Omega_i} S(U) d\Omega_i \quad (5)$$

Şimdi hücre merkezli sonlu hacim yöntemi gereği bilinmeyenlerin, h, hu ve hv , her bir Ω_i hücresi boyunca sabit olarak o hücrenin ağırlık merkezindeki değere eşit olduğu varsayımı yapılır. Yani, $[t_n, t_{n+1}]$ zamanda bir adım aralığını göstermek üzere integral ortalama değer teoreminden $\forall (x, y, t) \in \Omega_i \times [t_n, t_{n+1}]$ için

$$U(x, y, t) \approx U(x_i, y_i, t) =: U_i(t) = \frac{1}{A(\Omega_i)} \int_{\Omega_i} U(x, y, t) d\Omega_i \quad (6)$$

olduğu kabul edilir. Burada $A(\Omega_i)$, Ω_i üçgeninin alanını belirtir. Bu varsayım ile (5) denklemindeki zaman türevli birinci terim ve kaynak terimi integralleri aşağıdaki gibi sadeleşir.

$$\frac{dU_i(t)}{dt} + \frac{1}{A(\Omega_i)} \int_{\Omega_i} \nabla \cdot [E(U), G(U)] d\Omega_i = S(U_i) \quad (7)$$

Bu eşitlikteki akı gradyanını içeren ikinci terim ise aşağıdaki gibi Iraksama Teoremi gereği, \mathbf{n} ilgili hücrenin sınırındaki birim normal vektör ve Γ_i , Ω_i üçgeninin sınırını göstermek üzere, bölgesel integral sınır integraline indirgenir.

$$\frac{dU_i}{dt} + \frac{1}{A(\Omega_i)} \int_{\Gamma_i} [E(U), G(U)] \cdot \mathbf{n} d\Gamma_i = S(U_i) \quad (8)$$

Ayrıca akı teriminin sınır integrali her bir ara-yüz üzerinden integral toplamına eşittir, şöyleki

$$\frac{dU_i}{dt} + \frac{1}{A(\Omega_i)} \sum_{j=1}^3 \int_{\Gamma_{ij}} [E(U), G(U)] \cdot \mathbf{n}_{ij} d\Gamma_{ij} = S(U_i) \quad (9)$$

Şimdi her bir ara-yüzdeki akıya $\forall (x, y, t) \in \Gamma_{ij} \times [t_n, t_{n+1}]$ için

$$[E(U), G(U)] \approx [E(U_{ij}), G(U_{ij})] \quad (10)$$

gibi orta-nokta kuadratür yaklaşımı yapılırsa sığ akım denklemlerinin sonlu üçgen hacimlere ayrıklaştırılması

$$\frac{dU_i}{dt} = - \frac{1}{A(\Omega_i)} \sum_{j=1}^3 [E(U_{ij}), G(U_{ij})] \cdot \mathbf{n}_{ij} |\Gamma_{ij}| + S(U_i) \quad (11)$$

şeklinde elde edilir. Burada $|\Gamma_{ij}|$, i ile j hücreleri arasındaki ara-yüz doğrusal elemanın uzunluğudur.

4. ZAMAN YÖNÜNDE AYRIKLAŞTIRMA (TIME DISCRETIZATION)

Ara-yüzlerdeki akı hesabı için kullanılacak olan WAF teorik olarak hem zamanda hem de uzaya ikinci dereceden doğrulukludur. Ancak uzaydaki gibi zaman yönünde de ikinci derece doğruluğu garantilemek ve zaman entegrasyonunu iyileştirmek için ikinci dereceden iki adımlı Runge-Kutta yöntemi kullanılır. Şimdi Denklem

(11)'de bilinmeyen zamana bağlı türevi ayrıklaştırılacağından denklemin sağ tarafı bir Ω_i kontrol hücresi için $K(U_i(t))$ kısaltması ile gösterilsin

$$\mathbf{K}(U_i(t)) := - \frac{1}{A(\Omega_i)} \sum_{j=1}^3 [E(U_{ij}), G(U_{ij})] \cdot \mathbf{n}_{ij} |\Gamma_{ij}| + S(U_i)$$

buna göre

$$\frac{dU_i(t)}{dt} = K(U_i(t)) \quad (12)$$

eşitliği t zaman değişkenine göre bir adi diferansiyel denklemdir ve bir $t \in [t_n, t_{n+1}]$ zaman adımında $U_i(t) \approx U_i^n$ yaklaşımı ile ikinci derece doğruluklu Runge-Kutta uygulaması şöyle türetilir

$$U_i^p = U_i^n + \Delta t \mathbf{K}(U_i^n) \quad (13)$$

$$U_i^{n+1} = \frac{1}{2} (U_i^n + U_i^p + \Delta t \mathbf{K}(U_i^p))$$

Burada 'p' üst indisi bir öndeğerleme basamağını göstermektedir ve $\Delta t = t_{n+1} - t_n$ zaman adımındadır. Bu zaman adımı farklı boyutlardaki üçgenlere ayrılmış tanım bölgesinin her bir elemanında akı hesabını kontrollü tutacak şekilde belirlenir. Bunun için gerekli CFL (Courant Frederic Levy) koşulu [5]

$$\text{CFL} \leq 1 \quad (14)$$

olmasıdır. Δt ve CFL arasındaki bağıntı kullanılan çözüm örgüsüne veya akı için kullanılan sayısal yöntemle göre farklı şekillerde tanımlanabilir. Bu çalışmada belirtilen çözüm ağı ve sayısal yöntemle uyumlu olarak zaman adımı belirlemede aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır [15].

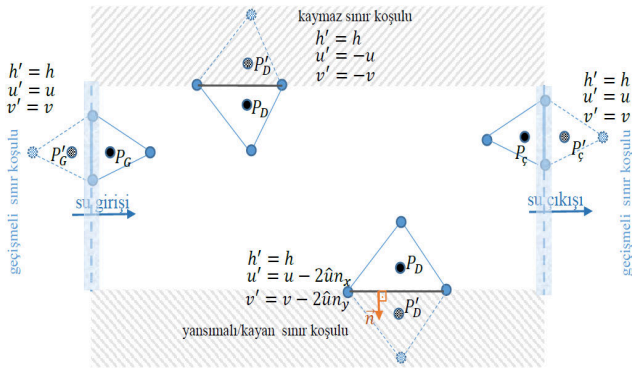
$$\Delta t \leq \text{CFL} \min_i \left(\frac{\min_j \{|\Gamma_{ij}|\}}{\max_j \{|\hat{\mathbf{u}}_{ij} + c_i\}} \right), \quad i \in [1, NT], \quad j = 1, 2, 3 \quad (15)$$

Burada $\hat{\mathbf{u}}_{ij} = u_i(n_x)_{ij} + v_i(n_y)_{ij}$, Γ_{ij} ara-yüzündeki normal hızdır (ara-yüze dik hız bileşeni), ve bir i kontrol noktası için c_i dalga hızı (celerity) olup $c_i = \sqrt{gh_i}$ ile verilir.

5. SINIR KOŞULLARI (BOUNDARY CONDITIONS)

Sayısal yöntemin hangi sınır koşullarıyla ve nasıl uygulanacağı da önemli bir ayrıntıdır. Özellikle hayali hücrelere sınır koşullarının atanması gibi

işlemler, sıralı-çözüm ağlarıyla karşılaştırıldığında sırasız-çözüm ağlarında daha zordur ve yazılımda oldukça dikkat gerektirir. Oluşabilecek farklı sınır-koşulu tipleri ve sınırdaki hayali hücre değerlerinin nasıl atanacağı, genelliği kaybetmeden dikdörtgenel bir kanal için Şekil 2'deki gibi örneklendirilebilir.



Şekil 2. Yardımcı sınır hücrelerinde sınır koşullarının atanması (Assigning boundary conditions to boundary ghost cells)

Burada P' kanal içindeki bir sınır kontrol noktasının yansımını sembolize eder. P ve P' noktalarının alt indislerinden G suyun girişini, C suyun çıkışını ve D katı duvar sınırlarını simgelemektedir. n_x ve n_y ilgili sınır hücresinin sınır-kenarındaki dış doğru birim normal vektörü $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ 'nin bileşenleridir. $\hat{u} = un_x + vn_y$ ilgili sınır yüzeyine dik hızı (normal hız) ve $\hat{v} = -un_y + vn_x$ ise aynı yüzeye teğet hızı verir. Bütün sınır koşulu tipleri için h, u ve v parametrelerinin bir P' hayali kontrol noktasında alacağı yaklaşık değerler h', u' ve v' parametreleri ile verilmiştir (Şekil 2, Tablo 1).

Tablo 1. Sınır koşuluna göre yardımcı hücre değişken değerlerinin atanması (Assigning boundary ghost cell values with respect to the boundary condition type)

$h' = h$ $u' = u - 2\hat{u}n_x$ $v' = v - 2\hat{u}n_y$	Kayan (slip) veya yansıyan (reflective) sınır koşulu
$h' = h$ $u' = -u$ $v' = -v$	Kaymaz (no-slip) sınır koşulu
$h' = h$ $u' = u$ $v' = v$	Geçişmeli (transmissive) sınır koşulu

Sırasız bir çözüm ağında eğrisel kanal sınırları söz konusu olduğunda sınırdaki yüzey elemanları düşey veya yatay olmayabilir. Bu nedenle atamalar açılı-sınır elemanları düşünülerek ve ilgili normal vektörü dikkate alınarak verilmiştir. Örneğin katı duvar sınırında bulunan bir üçgenin kontrol noktasındaki hız vektörünün yansımaları, ilgili duvar yüzeyine göre ortogonal izdüşüm alınarak elde edilir (Tablo 1). Sınırdaki ve yardımcı hücrelerde gereken momentum değerleri de bu atamalar yardımıyla verilebilir. Örneğin yardımcı bir sınır hücresindeki x -momentumunun değeri $(hu)' = h'u'$ olacak şekilde derinlik ve hız bileşenlerinin atanmış hayali değerlerinin çarpımıyla hesaplanabilir. Ya da yeni bir işlem gerektirmeden bu çalışmada olduğu gibi her bir iterasyonun sonucunda elde edilen momentum değerleri direkt olarak bir sonraki iterasyonda kullanılmak üzere atanır. Bununla birlikte Tablo 1'deki hız bileşenlerinin izdüşümlerindeki yön ve işaret değişiklikleri hayali sınır hücresi momentum değerleri için de dikkate alınmalıdır. Ayrıca su girişi sınırında ilk anda dikey bir hız söz konusu olmadığından $v_0 = 0$ olup, y -momentumunun başlangıç değeri $(hv)_0 = 0$ alınır.

6. AĞIRLIK ORTALAMALI AKI YÖNTEMİ (WEIGHTED AVERAGED FLUX METHOD)

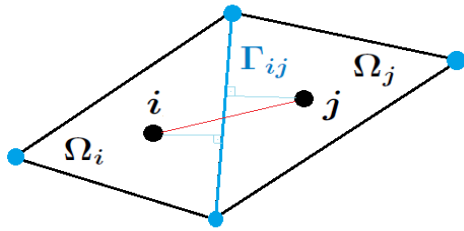
Bu bölümde süreklilik ve momentum denklemlerinin akı hesabı için ikinci derece doğruluklu ağırlık ortalamalı akı yönteminin uygulanışı anlatılmaktadır. Bu çalışmada WAF yöntemi HLLC Riemann çözücüsüyle beraber kullanılmıştır. Esasında bu yöntem Godunov Rüzgar Yönlü yönteminin ikinci mertebeden doğruluğa yükseltilmesidir [5, 6]. WAF-HLLC de yine 'rüzgar yönlü' bir şema olup ara-yüz hesaplarında akım yönünü dikkate aldığı için daha doğru akı sonuçları vermektedir. Ancak zaman ve uzayda daha yüksek mertebeden sayısal çözüm yolları salınımlı sonuçlar doğurmaktadır. Bu salınımları söndürmek için ise ara-yüzlerde gradyan hesaplarında eğim-sınırlayıcıları veya akı-sınırlayıcılarını kullanmaya olanak veren 'Toplam Salınım Azaltmalı' (TVD) formundan yararlanılır. TVD teorisiyle ilgili detaylı çalışma, Versteeg ve Malalasekera 'nın ortak kitabından [18] faydalanılarak yapılmıştır. Özellikle unstructured çözüm ağları için sundukları TVD şeması ara-yüz gradyan hesaplarında çok gereklidir. Ayrıca TVD formunda ihtiyaç duyulan gradyan sınırlamaları Tu ve Aliabadi [19] 'nin makalesinde olduğu gibi yapılır. Önce her bir ara-

yüzeyde bu yüzeyi paylaşan hücre bilgileri kullanılarak ara-yüz gradyan yaklaşımları hesaplanır. Daha sonra her bir hücrenin üç kenar gradyanının alan-ağırlıklı ortalamaları alınarak gradyan hesabı hücre merkezine taşınır. Daha ileri bir adım olarak bu merkezil gradyan değerleri bir akı-sınırlayıcı fonksiyonu yardımıyla sınırlanır. Sırasız ağlar için verilen bu üç basamaklı yaklaşım ilk kez bu çalışmada sunulmuştur. Aşağıda sırasız ağda iç-hücreler ve özellikle sınır-hücreleri için gradyan hesaplama ve sınırlandırma işlemleri ayrıntılı olarak verilmektedir.

6.1. HLLC Riemann Çözücüsü (HLLC Riemann Solver)

Godunov tipli sayısal yöntemlerde ara-yüz akı hesaplarında gerçek veya yaklaşık Riemann çözücülerinden faydalanılır. SAD denklemlerinde ise yaklaşık Riemann çözücülerini kullanmak gerçek (analitik) Riemann çözücülere göre %20 daha verimlidir [5]. Bu yaklaşık Riemann çözücülerden Roe ve HLL (Harten, Lax ve van Leer) özellikle 1-boyutlu uygulamalarda [16] kullanılmaktadır. Çalışmanın bu kısmında 2-boyutlu SAD çözümü için WAF ile daha uyumlu HLLC (burada C ara-yüz temas (contact) dalgasını belirtir) Riemann çözücüsü kullanılacaktır.

Şekil 3'te sırasız bir çözüm ağında herhangi Ω_i ile Ω_j komşu üçgenlerinin doğrusal ara-yüz elemanı olan Γ_{ij} gösterilmiştir.



Şekil 3. Komşu hücreler ve ortak yüzey Γ_{ij} (Neighbouring cells and the common interface Γ_{ij})

Buna göre sırasız bir ağda herhangi bir ara-yüzde Riemann problemi şöyle sunulabilir

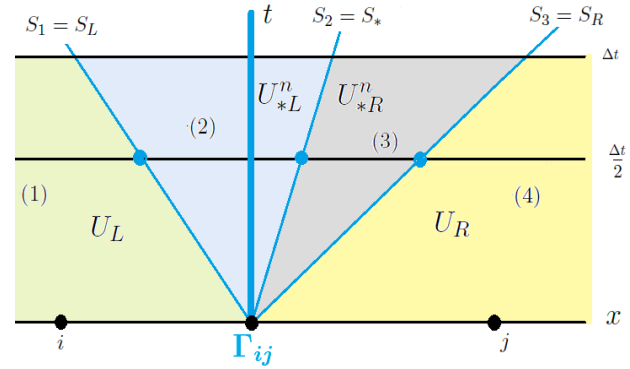
$$\frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \cdot F(U) = 0$$

$$U(x, y, t) = \begin{cases} U_i^n(x, y, t) \in \Omega_i - \Gamma_{ij} \times [t_n, t_{n+1}] \\ U_j^n(x, y, t) \in \Omega_j - \Gamma_{ij} \times [t_n, t_{n+1}] \end{cases} \quad (16)$$

Burada $F(U) = [E(U), G(U)]$ akıdır. Bu ara-yüzdeki Riemann probleminin çözümü ise $U_{ij}(x, y, t)$ ile gösterilir. Yani çözüm Ω_i ile Ω_j üçgenleri arasındaki doğrusal elemana, Γ_{ij} 'ye aittir. Bir (x, y, t) noktasının ait olduğu üçgen

bölgeye göre merkezil nokta çözüm gösterimleri $U_i^n = U(x_i, y_i, t_n)$ ve $U_j^n = U(x_j, y_j, t_n)$ şeklindedir.

Ara-yüz Γ_{ij} 'in her iki yanında ve tam üzerinde oluşan dalga tipleri Riemann yaklaşımlarında önemlidir. Bu dalgalar ara-yüzün sağında ve solunda oluşan şok dalgaları veya seyreltik (rarefaction) dalgalar olabileceği gibi tam ara-yüz üzerinde oluşan kesme (shear) veya temas yüzeyi (contact) dalgaları da olabilir. Buna göre HLLC Riemann çözücüsünün ara-yüz dalga yapısı Şekil 4'teki gibidir [5].



Şekil 4. Ara yüzey dalga tahminleri (Interface wave structures)

Görüldüğü üzere HLLC, ara-yüz dalga profilini 3 dalga ile 4 bölgeye ayırır. Burada S_R ve S_L üçgenlerin konumuna göre sırasıyla ara-yüzün iki yanındaki sağ ve sol dalgaları, S_* da (2) ve (3) bölgelerinin birleşiminden oluşan yıldız bölgesindeki orta dalgayı ifade eder. U_L, U_R, U_{*L} ve U_{*R} ise Şekil 4'te numaralandırılmış bölgelerdeki çözümleri vermektedir.

Ara-yüzün solunda kalan noktalar için yaklaşık çözümler i kontrol noktasındaki değer olarak alınır. Benzer şekilde ara-yüzün sağında kalan noktalar için de çözümler j kontrol noktasındaki değer olarak alınır. Yani yaklaşımlar,

$$U_L = U_i^n, \quad U_R = U_j^n \quad (17)$$

şeklindedir. Yukarıdaki dalga tahminlerinin (Şekil 4) varlığı kabul edilerek herhangi bir Γ_{ij} ara-yüzündeki sayısal HLLC akı yaklaşımı aşağıdaki gibi türetilir [5, 6].

$$F^{HLLC}|_{\Gamma_{ij}} = \begin{cases} F_L, & 0 \leq S_L \\ F_{*L}, & S_L \leq 0 \leq S_* \\ F_{*R}, & S_* \leq 0 \leq S_R \\ F_R, & S_R \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

Dalga bölgelerine göre akı yaklaşımları açıkça Tablo 2'de tanımlanmıştır.

Tablo 2. Dalga bölgelerine göre HLLC akı yaklaşımları (HLLC flux approximations according to wave structures)

$F_L = F(U_i^n) = [E(U_i^n), G(U_i^n)]$	bölge (1) deki akı
$F_{*L} = F_L + S_L(U_{*L}) - U_L$	bölge (2) deki akı
$F_{*R} = F_R + S_R(U_{*R}) - U_R$	bölge (3) deki akı
$F_R = F(U_j^n) = [E(U_j^n), G(U_j^n)]$	bölge (4) deki akı

Ayrıca yıldız bölgesinin sağ ve sol değişken değerleri ve ilgili parametreler aşağıdaki gibi verilir [5].

$$U_{*K} = h_K \begin{pmatrix} S_K - u_K \\ S_K - S_* \\ v_K \end{pmatrix}, \quad K = L, R \quad (19)$$

$$S_L = u_L - p_L \sqrt{gh_L}, \quad S_R = u_R - p_R \sqrt{gh_R}$$

$$p_K = \begin{cases} \sqrt{\frac{h_*(h_* + h_K)}{2h_K^2}}, & h_* > h_K \\ 1, & h_* \leq h_K \end{cases} \quad (20)$$

$$h_* = \frac{1}{g} \left[\frac{1}{2} (\sqrt{gh_L} + \sqrt{gh_R}) + \frac{1}{4} (u_L - u_R) \right]^2$$

$$u_* = \frac{1}{2} [u_L + u_R] + \sqrt{gh_L} - \sqrt{gh_R} \quad (21)$$

$$S_* = \frac{S_L h_R (u_R - S_R) - S_R h_L (u_L - S_L)}{h_R (u_R - S_R) - h_L (u_L - S_L)}$$

Dikkat edilirse Denklem (19)'da tanımlı U_{*K} 'in üçüncü bileşenindeki v_K , $K = L, R$ ilgili ara-yüzün sol(L) veya sağ(R) hücrelerindeki teğetsel hız bileşenidir. u_K , $K = L, R$ ise yönü sol veya sağ komşu üçgenlere göre belirli ara-yüze dik normal hız bileşenidir.

6.2. WAF Yönteminin Sırasız Ağda Toplam Salınım Azaltmalı Formu (TVD Version of WAF on Unstructured Grids)

Genel olarak herhangi bir ara-yüzde akı, WAF yöntemi ile aşağıdaki gibi formüle edilir [5, 6].

$$F_{ij}^{WAF} = \sum_{k=1}^{N+1} \beta_k F_{ij}^{(k)} \quad (22)$$

N dalga sayısını ve $F_{ij}^{(k)}$, bu dalgaların her bir Γ_{ij} ara-yüzünde ayırdığı (Şekil 4) $k = 1, 2, 3, 4$ bölgelerindeki akıları gösterir. Katsayılar

$$\beta_k = \frac{1}{2} (c_k - c_{k-1}), \quad k = 1, \dots, N + 1$$

$$c_0 = -1, \quad c_{N+1} = 1, c_k = \frac{\Delta t}{d_{ij}} S_k \quad (23)$$

şeklinindedir. Her bir k dalgası için dalga hızları S_K , Courant sayıları c_k ile gösterilir. d_{ij} , i ve j komşu üçgenlerin ağırlık merkezleri arasındaki uzaklıktır (Şekil 3). Uygulanacak WAF yönteminde HLLC Riemann çözücüsü (Denklem (18)) ile çalışıldığında $N = 3$ tane dalga için akı yaklaşımı (Denklem (22)) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$F_{ij}^{HLLC-WAF} = \frac{1}{2} (F_i + F_j) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 c_k \Delta F_{ij}^{(k)} \quad (24)$$

$$\Delta F_{ij}^{(k)} = F_{ij}^{(k+1)} - F_{ij}^{(k)}$$

Daha ileri bir adım olarak 2. mertebeden doğruluklu bu yöntemin, çözümde oluşabilecek salınımları söndürmeye yardımcı bir toplam salınım azaltmalı formu kullanılır. Dolayısıyla akının herhangi bir ara-yüzdeki TVD-WAF ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$F_{ij}^{TVD-WAF} = \frac{1}{2} (F_i + F_j) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \sigma(c_k) \phi_{ij}^{(k)} \Delta F_{ij}^{(k)} \quad (25)$$

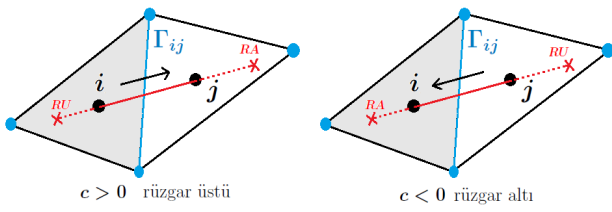
$\sigma(\cdot)$ işaret fonksiyonudur ve ϕ_k rüzgar yönlü ve yerel değişimlerin oranına bağlı bir akı sınırlayıcı fonksiyondur. Kaynaklarda Superbee, van Leer, van Albada ve minbee gibi çeşitleri bulunmaktadır [5, 6]. Bu çalışmada oluşturulan bilgisayar kodu yukarıdaki bahsedilen akı sınırlayıcı fonksiyon tiplerinin hepsi için çalıştırılabilir esneklikte olup sayısal sonuçlar ortak olarak minbee akı sınırlayıcı fonksiyonu yardımıyla hesaplanmıştır. Minbee sınırlama fonksiyonu şöyledir [5].

$$\phi(r, |c|) = \begin{cases} 1 & , r \leq 0 \\ 1 - (1 - |c|)r & , 0 \leq r \leq 1 \\ |c| & , r \geq 1 \end{cases} \quad (26)$$

Sıralı bir çözüm ağında çalışılıyor olsaydı r rüzgar yönlü ve yerel değişim oranları her bir dalganın yönüne göre aşağıdaki gibi tanımlanırdı [5]

$$r^{(k)} = \begin{cases} \frac{\Delta q_{i-\frac{1}{2}}^{(k)}}{\Delta q_{i+\frac{1}{2}}^{(k)}} = \frac{q_i^{(k)} - q_{i-1}^{(k)}}{q_{i+1}^{(k)} - q_i^{(k)}}, & c_k > 0 \\ \frac{\Delta q_{i+\frac{3}{2}}^{(k)}}{\Delta q_{i+\frac{1}{2}}^{(k)}} = \frac{q_{i+2}^{(k)} - q_{i+1}^{(k)}}{q_{i+1}^{(k)} - q_i^{(k)}}, & c_k < 0 \end{cases} \quad (27)$$

Yukarıdaki ifade incelendiğinde sıralı bir çözüm ağında bir $i + \frac{1}{2}$ ara-yüzeyi üzerindeki (i ile $i + 1$ hücreleri arasındaki yüzey) değişim oranlarını hesaplamak için q herhangi bir bilinmeyi göstermek üzere q değişkeninin i hücresindeki değerine ek olarak solundaki, q_{i-1} , sağdaki, q_{i+1} ve sağdaki ikinci, q_{i+2} kontrol noktasındaki değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Sıralı bir çözüm ağında hücreler birbirini yatay veya dikey olarak takip ettiğinden bunu yapmak kolaydır. Ancak sırasız bir çözüm ağında hücreler birbirini belli bir sırayla takip etmediği ve hücre kenarları paralel olmadığı için gradyan değişimleri yukarıdaki gibi tanımlanamaz. Literatürde sırasız ağlar için gradyan değişimlerini tanımlayan çok az kaynak bulunmaktadır. Bunlardan Versteeg ve Malalasekera [18] kitaplarında sırasız ağlar için TVD şemalarına değinmiştir. Bu çalışmada da ara-yüz gradyan değişim oranları bu TVD şemalarından faydalanılarak, geliştirilen yazılıma uyumlu olacak biçimde ve sırasız üçgen çözüm ağı üzerinde, yeniden tanımlanmıştır.



Şekil 5. Akım yönüne göre rüzgar altı (RA) ve rüzgar üstü (RU) noktalarının seçimi (Selection of downstream and upstream nodes upon the flow direction)

Şekil 5'te görüldüğü gibi Courant sayısının işareti rüzgar üstü, RU, ve rüzgar altı, RA, durumlarını belirtir.

Öncelikle ϕ bir akı sınırlayıcı fonksiyon (Denklem (26) gibi) ve q herhangi bir değişken (derinlik, debi veya hız) olmak üzere bir Γ_{ij} ara yüzeyinde TVD şeması aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$q_{arayüz} = \begin{cases} q_{RU} + \frac{1}{2} \phi(r_{RU}, |c|)(q_{RA} - q_{RU}), & c > 0 \\ q_{RA} + \frac{1}{2} \phi(r_{RA}, |c|)(q_{RA} - q_{RU}), & c < 0 \end{cases} \quad (28)$$

Şimdi q değişkeninin RA ve RU değerleri rüzgar yönüne göre yaklaşık olarak kontrol nokta değerleri olarak alınsın. Bu aşamada RA ve RU değerlerini Şekil 5'te gösterilen yerlere interpolasyon ile kaydırmak hem çok külfetli olmakta hem de özellikle sınırda hayali hücre değerlerine ihtiyaç duyulacağından çözümün doğruluğunu azaltmaktadır. Ayrıca RA ve RU nokta koordinatları komşu hücrelere de

taşabileceğinden bir de üstüne komşu hücre örgü noktalarından gelen değerlerle yapılacak yaklaşımlar çok sağlıklı olmayacaktır. Bunun yerine hali hazırda elimizde olan kontrol nokta değerlerinin (i ve j hücre merkezlerindeki değerler) kullanılması daha elverişli ve verimli bir iş olacaktır. Buna göre Denklem (28) yeniden düzenlenecek olursa

$$q_{ij} = \begin{cases} q_i + \frac{1}{2} \phi(r_{RU}, |c_k|)(q_j - q_i), & c > 0 \\ q_j + \frac{1}{2} \phi(r_{RA}, |c_k|)(q_j - q_i), & c < 0 \end{cases} \quad (29)$$

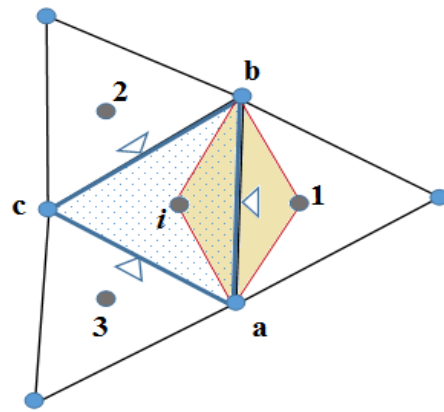
elde edilir. Böylece bu TVD şemasıyla rüzgar yönlü gradyan değişim oranları sırasız üçgen çözüm örgüsünde aşağıdaki gibi türetilir,

$$r^{(k)} = \begin{cases} r_{RU} = \frac{2\nabla q_i \cdot \vec{r}_{ij}}{q_j - q_i} - 1, & c_k > 0 \\ r_{RA} = \frac{2\nabla q_j \cdot \vec{r}_{ji}}{q_i - q_j} - 1, & c_k < 0 \end{cases} \quad (30)$$

Burada $\vec{r}_{ij} = (x_j - x_i, y_j - y_i)$ ile yönü i noktasından j noktasına doğru olan konum vektörü belirtilmektedir.

6.3. Ara Yüzeylerde Gradyan Yaklaşımı (Interface Gradient Approximation)

Bu bölümde sırasız bir çözüm ağında herhangi bir kenarı tanım bölgesinin sınırı üzerinde olmayan bir üçgen hücre ve bu hücrenin komşularıyla paylaşacağı ara yüzeylerinde gradyan yaklaşımı işlenmiştir. Herhangi bir kenarı sınırda olan hücreler için gradyan hesabına sonraki bölümde değinilecektir.



Şekil 6. Ara-yüz gradyan yaklaşımı (Interface gradient approximation)

Şekil 6'daki gibi belirli bir \vec{ab} doğrusal elemanın (ya da Γ_{i1} ara-yüzeyi) üzerinde gradyan yaklaşımı

için taralı $ia1b$ dörtgeninin köşe noktalarındaki değişken değerlerine ihtiyaç vardır.

$$\nabla q_{i1} = \left(\frac{\partial q}{\partial x} \Big|_{i1}, \frac{\partial q}{\partial y} \Big|_{i1} \right) \quad (31)$$

ifadesi Γ_{i1} ara yüzeyindeki yaklaşık gradyan değeri olmak üzere bileşenleri için bilinen en basit yaklaşım

$$\begin{aligned} \frac{\partial q}{\partial x} \Big|_{i1} &= \frac{1}{2A_{ia1b}} [(q_1 - q_i)(y_b - y_a) \\ &\quad + (q_a - q_b)(y_1 - y_i)] \\ \frac{\partial q}{\partial y} \Big|_{i1} &= \frac{-1}{2A_{ia1b}} [(q_1 - q_i)(x_b - x_a) \\ &\quad + (q_a - q_b)(x_1 - x_i)] \end{aligned} \quad (32)$$

şeklinde. Burada A_{ia1b} ile $ia1b$ taralı dörtgeninin alanı gösterilmektedir. Denklem (32)'deki gradyan yaklaşımı (Taylor seri açılımlarında birinci türeve kadar olan terimlerle yaklaşım yapıldığından) 1. mertebeden yaklaşım olup çözüm ağı uniform üçgenlerden oluştuğunda kullanılması daha uygundur. Ancak çözüm kodunun çoklu bağlantılı ve düzensiz geometrilerde kullanılacağı düşünüldüğünde bu uniformluk garanti edilemez. Bu bağlamda gradyan yaklaşımını iyileştirmek gerekmektedir. Bunun için Tu ve Aliabadi [19]'nin ortak yayınında olduğu gibi her bir kontrol noktasındaki gradyan hesabı ilgili hücrenin tümüne ve komşularına ağırlıklı ortalamalı olarak dağıtılıp sınırlandırılacaktır. İşlem basamakları aşağıdaki gibidir.

Önce bir Ω_i üçgeninin her bir kenarında (32) yaklaşımı ile kenar gradyanlar hesaplanır sonra bunların alan-ağırlıklı ortalamaları alınarak i kontrol noktasındaki gradyan

$$\nabla q_i = \frac{A_{ia1b} \nabla q_{i1} + A_{ib2c} \nabla q_{i2} + A_{ic3a} \nabla q_{i3}}{A_{ia1b} + A_{ib2c} + A_{ic3a}} \quad (33)$$

olarak elde edilir. Daha ileri bir adım olarak bu yaklaşım van Albada'nın 1-boyutlu sınırlama fonksiyonuna benzer bir ağırlık fonksiyonu yardımıyla ilgili üçgeni çevreleyen komşu gradyanlarla aşağıdaki gibi sınırlanır.

$$\nabla q_i^S = \omega_1 \nabla q_1 + \omega_2 \nabla q_2 + \omega_3 \nabla q_3 \quad (34)$$

Burada üst indis, S , sınırlandırılmış gradyanı temsil eder. ω_1, ω_2 ve ω_3 sınırlayıcı ağırlık fonksiyonları olup şöyle tanımlanırlar [19]

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{g_2 g_3 + \epsilon}{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 + 3\epsilon} \\ \omega_2 &= \frac{g_1 g_3 + \epsilon}{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 + 3\epsilon} \\ \omega_3 &= \frac{g_1 g_2 + \epsilon}{g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 + 3\epsilon} \end{aligned} \quad (35)$$

$g_1 = \|\nabla q_1\|^2, g_2 = \|\nabla q_2\|^2$ ve $g_3 = \|\nabla q_3\|^2$ sınırlandırılmamış gradyanların $\|\cdot\| = L_2$ normlarının kareleridir. ϵ ise 10^{-10} olarak alınmıştır. Böylece sınırda kenar bulundurmeyen her üçgenin kontrol noktasında gradyan yaklaşımları hesaplanmış oldu.

Tanım bölgesinin sınırında bir veya iki kenar (köşe üçgen ise) elemanı bulandıran sınır-üçgenleri için ise yukarıdaki sınırlı-gradyan yaklaşımına benzer şekilde ancak ilgili doğrusal eleman üzerindeki sınır koşuluna dikkat edilerek aşağıdaki gibi bir yol izlenir.

6.4. Sınırdaki Gradyan Yaklaşımı (Gradient Approximation on Boundary)

$r^{(k)}$ oranları hesaplanırken ara-yüzün solunda ve sağında oluşan S_1 ve S_3 dalgaları için değişken $q = h$ alınırken S_2 dalgası için ise q değişkeni ilgili ara-yüzdeki teğetsel hız yani $q = \hat{v}$ alınır. Bu durum dikkate alınarak yardımcı sınır hücrelerinde h veya \hat{v} değerleri ilgili sınır koşuluna göre düzgün atanmalıdır. Gerekli cebirsel işlemler yapıldığında ilgili değişkenin yardımcı sınır hücre merkezindeki gradyan tayinleri aşağıdaki gibi türetilir. P bir sınır-hücre (bir veya iki kenarı sınır elemanı olan üçgen) olmak üzere P' bu sınır-hücreye yardımcı sınır hücre (P hücrenin hayalini) temsil etsin. Buna göre

- Eğer $q = h$ ise sınır koşulu tipi ne olursa olsun $h_{P'} = h_P$ olarak atanacağından derinliğin sınırdaki gradyan yansıması yani hayali hücre kontrol noktasındaki gradyanı sınır hücredekiyle aynıdır.

$$\nabla h_{P'} = \nabla h_P \quad (36)$$

- Eğer $q = \hat{v}$ ise sınır koşulu geçişmeli de olsa yansımaları da olsa hayali sınır hücredeki gradyanı aşağıdaki gibi atanır.

$$\nabla \hat{v}_{P'} = -\nabla \hat{v}_P \quad (37)$$

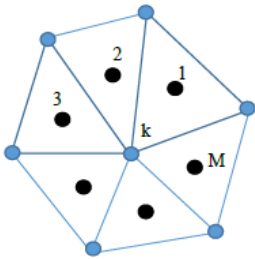
Böylece bir hayali hücredeki gradyan, gerçek sınır-hücre gradyan değeri bilinerek direkt

atanabilir. Yukarıdaki bölümde (Bölüm 6.3) bahsedilen üç aşamalı gradyan tayini basamaklarını tekrar etmek gerekmez. Türetilen (36) ve (37) denklemleri sınır gradyan atamalarında işlem yükü açısından önemli bir sadeleştirir.

6.5. İç-Örgü Nokta Değerleri (Interior Grid Node Values)

Görüldüğü üzere hem gradyan hesabı için hem de sayısal sonuçların görselleştirilmesi aşamasında örgü noktalarındaki bilinmeyenlerin h, hu ve hv değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için ilgili örgü noktasını çevreleyen mevcut kontrol noktası değerlerinden faydalanılır. Tüm çevre kontrol nokta değerlerinin uzaklık-ağırlıklı içdeğerlemesi ile bu noktadaki çözüme bir yaklaşım elde edilebilir.

Örneğin bir k iç-örgü noktasındaki herhangi bir bilinmeyen değerine, M, k 'yı çevreleyen kontrol noktaları sayısı olmak üzere, aşağıdaki gibi bir iç değerleme ile ulaşılabilir.



$$U_k = \frac{\sum_{m=1}^M \frac{U_m}{d_{m,k}}}{\sum_{m=1}^M \frac{1}{d_{m,k}}}$$

Burada $d_{m,k}$, m kontrol noktası ile k örgü noktası arasındaki uzaklığı belirtir. Eğer örgü noktası aynı zamanda sınır noktası ise değişkenin sınırda aldığı değere göre veya sınır koşuluna göre atanan hayali komşu kontrol noktası değerleri hesaba katılır.

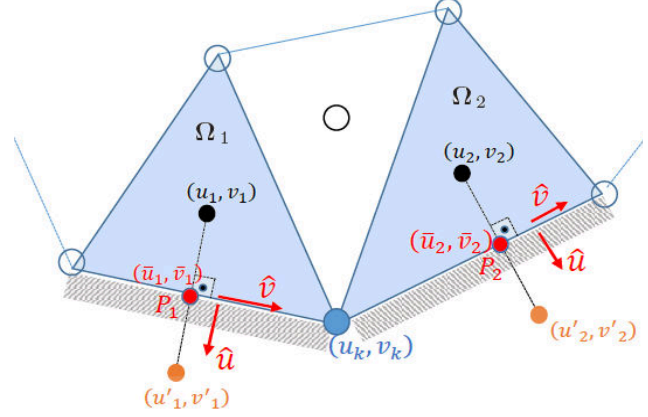
6.6. Sınır-Örgü Noktalarında Yaklaşım (Approximation at Boundary Grid Nodes)

Sınır örgü noktalarındaki çözüm için de yine iç noktalardan değerler atanır. Sırasız ağda herhangi bir sınır noktasında veya bu sınır noktasını üzerinde bulandıran sınır elemanı üzerinde yüzeye normal veya teğet hızlar cinsinden hız bileşenleri aşağıdaki gibidir [20]

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \hat{u}n_x - \hat{v}n_y \\ \bar{v} &= \hat{u}n_y + \hat{v}n_x \end{aligned} \quad (38)$$

Şekil 7'de herhangi Ω_1 ve Ω_2 sınır hücrelerinin sınırda paylaştığı bir k sınır-örgü noktası için yaklaşım basamakları resmedilmiştir. Buna göre

önce sınır hücre merkezil değerleri ilgili sınır koşulu ve Denklem (38) yardımıyla sınırdaki en yakın noktalara, P_1 ve P_2 'ye, taşınır. Daha sonra P_1 ve P_2 noktalarındaki bu hız yaklaşımlarının uzaklık-ağırlıklı ortalamaları alınarak ortak k örgü noktasında yaklaşık (u_k, v_k) değerlerine ulaşılır. Yüzeylerdeki \hat{u} ve \hat{v} yönleri sembolik olarak gösterilmiştir. Rüzgar yönüne göre değişebilir.



Şekil 7. Bir sınır-örgü noktası için iç değerleme (Interpolation for a boundary grid node)

Böylece k sınır-örgü noktasındaki hız bileşen yaklaşımları şöyle elde edilir.

$$u_k = \frac{\frac{\bar{u}_1}{d_{1,k}} + \frac{\bar{u}_2}{d_{2,k}}}{\frac{1}{d_{1,k}} + \frac{1}{d_{2,k}}}, \quad v_k = \frac{\frac{\bar{v}_1}{d_{1,k}} + \frac{\bar{v}_2}{d_{2,k}}}{\frac{1}{d_{1,k}} + \frac{1}{d_{2,k}}} \quad (39)$$

Burada $d_{1,k}$, P_1 yüzey noktası ile k grid noktası arasındaki uzaklığı belirtir. Benzer şekilde $d_{2,k}$, P_2 yüzey noktası ile k grid noktası arasındaki uzaklıktır. Kodlama yapılırken su girişi ve su çıkışının olduğu sınır yüzeylerinde hayali sınır hücrelerde hız değerlerinin aynısının atanacağı ve katı duvar yüzeylerinde ise yüzeye normal hızın sıfır atanacağı hatırlanmalıdır. Böylece yukarıdaki yaklaşım basitleştirilerek işlem yükü azaltılır.

Çözüm kodu yazılırken yukarıdaki cebirsel ve vektörel incelemeler ışığında hayali sınır hücreleri için tekrar tekrar normal vektörü hesaplama veya gradyan hesaplama gibi işlemler elenmiştir. Dikkat edilecek olursa hayali hücre değeri ilgili sınır hücre değerinin aynısı veya ters işaretlisi veya vektörel yansıması olmaktadır. Kodlama sırasında bir hücrenin sınırda veya sınır köşesinde olup olmadığı kontrol edilerek gereken atamalar mevcut iç değerler yardımıyla kolaylıkla yapılır ve ekstra işlem gerekmez.

Sonuç olarak sırasız ağlarda yüksek doğruluklu sonlu hacim yönteminin HLLC tabanlı WAF

yöntemiyle akı hesabı aşağıdaki gibi formüle edilir.

7. ÜÇGEN ÇÖZÜM ÖRGÜSÜNDE TVD-WAF YÖNTEMİ (TVD-WAF METHOD ON TRIANGULAR GRID)

7.1. Rotasyonel Değişmezlik Özelliği ve Normal Akının TVD-WAF İle Çözümü (Rotational Invariance Property and TVD-WAF Solution of Normal Flux)

2-boyutlu sıg su denklemleri (Denklem (4)) her U bağımlı değişken vektörü ve her θ dışa doğru birim normal vektör açısı için

$$F(U) \cdot \mathbf{n} = [E(U), G(U)] \cdot \mathbf{n} = \mathbf{T}^{-1}E(TU) \quad (40)$$

eşitliğini sağlar. $\mathbf{n} = (n_x, n_y) = (\cos \theta, \sin \theta)$ dışa doğru birim normal vektörü, $\mathbf{T}(\theta)$ rotasyon matrisi ve $\mathbf{T}^{-1}(\theta)$ onun tersidir.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$\mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

Bu önerme 'Rotasyonel Değişmezlik Özelliği'dir [5] ve akı hesabının akının sadece birinci bileşeni $E(U)$ ile yapılabileceğini göstermektedir. Özellikle sırasız çözüm örgülerinde bu özelliğin kullanılmasıyla zaman ve işlemden büyük tasarruf sağlanmış olur. Dolayısıyla bu çalışmada normal-akı, $F(U) \cdot \mathbf{n}$ için WAF yaklaşımında HLLC Riemann çözücüsüyle rotasyonel değişmezlik özelliği beraber kullanılacaktır.

Önce bir Ω_i kontrol hücrelerinin her bir Γ_{ij} ara yüzeyindeki normal-akısı rotasyonel-değişmezlik özelliği gereği aşağıdaki gibi sadece x -yönündeki bileşenine indirgenir

$$[E(U_{ij}), G(U_{ij})] \cdot n_{ij} = T_{ij}^{-1}E(T_{ij}U_{ij}) \quad (42)$$

T rotasyon matrisinin tanımı kullanılarak U 'nun rotasyonu

$$TU = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & n_x & n_y \\ 0 & -n_y & n_x \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h \\ h\hat{u} \\ h\hat{v} \end{bmatrix} = \hat{U} \quad (43)$$

şeklinde elde edilir. Burada \hat{u} ilgili ara-yüzeydeki normal hız ve \hat{v} ara-yüzeydeki teğetsel hızdır.

Yani ara-yüzeyin dışa doğru birim normal vektörüne göre hesaplanmış yönelimli hızlardır. Böylece akının birinci bileşeninin rotasyonu

$$E(TU) = E(\hat{U}) = \begin{bmatrix} h\hat{u} \\ h\hat{u}^2 + gh^2/2 \\ h\hat{u}\hat{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_1\hat{v} \end{bmatrix} \quad (44)$$

olarak elde edilir. Gösterimde ve işlemlerde sadelik açısından bileşenler E_1 , E_2 ve E_3 ile ifade edilecektir. Dikkat edilecek olursa (44) ifadesinde dönüştürülmüş akının sadece birinci E_1 ve ikinci E_2 bileşeni için Riemann problem çözümü yapılacak ve üçüncü bileşen E_3 ise çözüm gerektirmeden birinci bileşenin \hat{v} ile çarpılması sonucu cebirsel olarak elde edilebilecektir. Son olarak rotasyonel matrisin tersi, \mathbf{T}^{-1} , ile çarpım yapıp istenilen normal-akı en kısa ve verimli yoldan hesaplanabilecektir.

Şimdi $E(\hat{U})$ çözümünün bir Γ_{ij} ara-yüzeyinde yüksek doğruluklu HLLC tabanlı TVD-WAF uygulaması (25) denkleminde göre

$$E(\hat{U}_{ij})^{TVD-WAF} = \frac{1}{2} \left(E(\hat{U}_{ij}^{(1)}) + E(\hat{U}_{ij}^{(4)}) \right) - \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 \sigma(c_k) \phi_{ij}^{(k)} \left(E(\hat{U}_{ij}^{(k+1)}) - E(\hat{U}_{ij}^{(k)}) \right) \quad (45)$$

olacaktır. Burada üst indisler Şekil 4' deki dalga bölgelerini göstermektedir. Bu bölgelerde yönelimli \hat{U} değişkeninin aldığı değerler

$$\begin{aligned} \hat{U}_{ij}^{(1)} &= \hat{U}_i, & \hat{U}_{ij}^{(2)} &= \hat{U}_{*i}, \\ \hat{U}_{ij}^{(3)} &= \hat{U}_{*j}, & \hat{U}_{ij}^{(4)} &= \hat{U}_j \end{aligned} \quad (46)$$

şeklinde olup ortak parametreler düzenlendiğinde Denklem (45) aşağıdaki formda tekrar yazılır.

$$E(\hat{U}_{ij})^{TVD-WAF} = C_1 E(\hat{U}_i) + C_2 E(\hat{U}_j) + C_3 \hat{S}_i [\hat{U}_{*i} - \hat{U}_i] + C_4 \hat{S}_j [\hat{U}_{*j} - \hat{U}_j] \quad (47)$$

Burada C_m katsayıları limit fonksiyonlarını ve rüzgar yönlerini içerir

$$C_m = \begin{cases} \frac{1+(-1)^{m-1}\sigma(c_2)\phi^{(2)}}{2}, & m = 1,2 \\ \frac{\sigma(c_{m-1})\phi^{(m-1)} - \sigma(c_{m-2})\phi^{(m-2)}}{2}, & m = 3,4 \end{cases} \quad (48)$$

Burada \hat{S} , \hat{U}_* veya \hat{U} ilgili ara-yüzeyin birim normal vektörüne göre dönüştürülmüş dalga ve

değişken değerleridir, öyleki genelliği bozmadan gösterim olarak ara-yüzeyin solunda hep Ω_i üçgeni, sağında da hep Ω_j üçgeninin yer aldığı kabul edilmektedir. Yani birim normal hep i noktasından j noktasına doğrudur. Buna göre süreklilik ve momentum denklemlerinin her biri için yönelimli değişkenin yıldız bölgesinin solundaki ve sağındaki değerler Denklem (19) tanımı ve Denklem (46) bölgesel atamalarına göre rotasyonel değerler dikkate alınarak atanır. Yani (19)-(21) arasındaki tüm tanımlarda u ve v hız bileşenleri yerine rotasyonel bileşenler yani \hat{u} (yüzeye dik hız) ve \hat{v} (yüzeye teğet hız) alınır. Aşağıdaki tabloda (Tablo 3) ara-yüzey dalga profilinin ıslak veya kuru zemin durumuna göre rotasyonel formları sunulmuştur.

Tablo 3. Islak/kuru zeminde birim normal yönelimli dalga değerleri (Wet/dry rotational wave structures)

$\hat{S}_K = \hat{u}_K - \hat{p}_K \sqrt{gh_K}$, $K = i, j$	Sağ ve sol ıslak zemin ise
$\hat{S}_* = \frac{\hat{S}_i h_j (\hat{u}_j - \hat{S}_j) - \hat{S}_j h_i (\hat{u}_i - \hat{S}_i)}{h_j (\hat{u}_j - \hat{S}_j) - h_i (\hat{u}_i - \hat{S}_i)}$	
$\hat{S}_i = \hat{u}_j - 2\sqrt{gh_j}$	Sol taraf kuru zemin ise
$\hat{S}_* = \hat{S}_i$	
$\hat{S}_j = \hat{u}_j + \sqrt{gh_j}$	
$\hat{S}_i = \hat{u}_i - \sqrt{gh_i}$	Sağ taraf kuru zemin ise
$\hat{S}_* = \hat{S}_j$	
$\hat{S}_j = \hat{u}_i + 2\sqrt{gh_i}$	

Şimdi Denklem (47) süreklilik ve momentum denklemlerine göre detaylandırılacak olursa, süreklilik denkleminin rotasyonel normal akısı sol ve sağ taraf için sırasıyla

$$\begin{aligned} E_1(\hat{U}_i) &= (h\hat{u})_i = h_i(u_i(n_x)_{ij} + v_i(ny)_{ij}) \\ E_1(\hat{U}_j) &= (h\hat{u})_j = h_j(u_j(n_x)_{ij} + v_j(ny)_{ij}) \end{aligned} \quad (49)$$

olup birim-normal yönünün hep i noktasından j noktasına doğru olduğuna dikkat edilmelidir. Benzer şekilde x -momentum denkleminin rotasyonel normal-akısı her iki taraf için

$$\begin{aligned} E_2(\hat{U}_i) &= (h\hat{u}^2 + gh^2/2)_i \\ E_2(\hat{U}_j) &= (h\hat{u}^2 + gh^2/2)_j \end{aligned} \quad (50)$$

ile tanımlanır. Ayrıca üçüncü bileşen yani y -momentum denklemi için teğetsel hızın rüzgar yönüne göre seçileceği de unutulmamalıdır, şöyleki

$$E_3 = \begin{cases} E_1 \hat{v}_i, & \text{eğer } \hat{S}_* \geq 0 \text{ ise} \\ E_1 \hat{v}_j, & \text{eğer } \hat{S}_* < 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (51)$$

7.2. Sınır Yüzeylerde Normal Akı Yaklaşımı (Normal Flux Approximation Along Boundary Faces)

Yukarıda verilen TVD-WAF yaklaşımı (Denklemler (44) ve (47)) sınırdaki yüzeylerde sınır koşulu tipine göre aşağıdaki sadeleştirmeleri içermektedir,

- Eğer sınır yüzeyinde ($\Gamma_{ii'}$ gibi) geçişmeli sınır koşulu var ise

$$E(\hat{U}_{ii'})^{TVD-WAF} = \begin{bmatrix} E_1(\hat{U}_{ii'}) \\ E_2(\hat{U}_{ii'}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

burada i' , i kontrol noktasının ilgili sınır elemanına göre yansıdığı noktadır. Buna göre $\Gamma_{ii'}$ sınır yüzeyindeki yönelimli değişken değerleri

$$\hat{U}_{ii'} = \begin{cases} \hat{U}_i, & i \text{ sınır elemanının solunda ise} \\ \hat{U}_j, & i \text{ sınır elemanının sağında ise} \end{cases} \quad (53)$$

şeklinde atanır. Ayrıca geçişmeli-sınır koşulunda ara yüzeye teğet hız $\hat{v} = 0$ olduğundan üçüncü akı bileşeni sıfır olmaktadır.

- Eğer yansımali veya kayan sınır koşulu var ise bu sefer ara yüzeyde normal hız sıfır olacağından yani $\hat{u} = 0$ ise,

$$E(\hat{U}_{ii'})^{TVD-WAF} = \begin{bmatrix} 0 \\ gh_{ii'}^2/2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

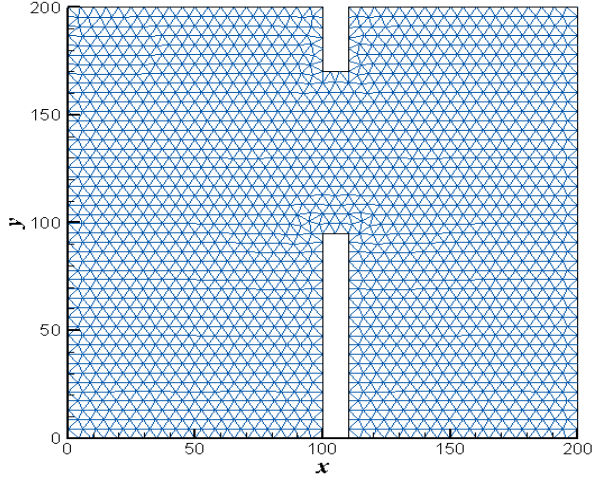
olur. Böylece sınırdaki akı hesabında hem işlem hem de zaman açısından tasarruf edilecektir.

8. SAYISAL SONUÇLAR (NUMERICAL RESULTS)

8.1. 2-Boyutlu Kısmi Baraj Yıkılma Problemi (2D Partial Dam Break Problem)

Kod ve yöntemin doğruluğu ilk olarak 2-boyutlu kısmi baraj yıkılma problemi [21] üzerinde test edilmiştir. Problem $(x, y) \in [0, 200] \times [0, 200]$ kare bölgesinde tanımlanmış olup üçgen çözüm

örgüsü Şekil 8 'de verilmektedir. Bölge MATLAB çözüm ağı üretici yardımıyla toplam 3505 üçgen hücreye bölünmüştür. Bu üçgenlerin köşe noktaları 1868 tane örgü noktasını oluşturmakta ve toplam 5372 doğrusal eleman doğurmaktadır. Bu elemanların 229 tanesi sınırda bulunmaktadır (barajın yıkılmasından sonra kalan parçalarının sınırı dahil).



Şekil 8. 2B baraj yıkılma problemi için akım bölgesi ve çözüm örgüsü (Flow domain and mesh for 2D dam-break problem)

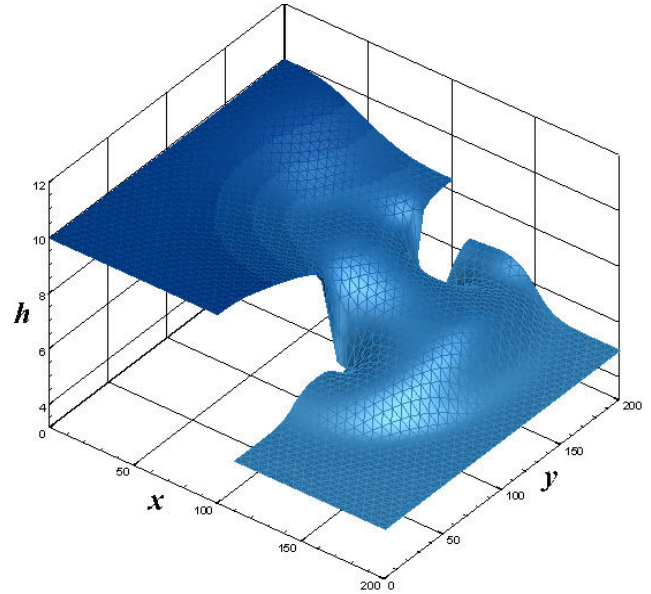
Akım pozitif x yönündedir. Baraj 10 m kalınlığındadır ve $x = 100$ m noktasında konumlanmıştır. Su derinliği başlangıçta barajın solunda h_0 ve sağında h_1 olarak alınır yani

$$h(t_0) = \begin{cases} h_0, & 0 \leq x \leq 100 \\ h_1, & 110 \leq x \leq 200 \end{cases} \quad (55)$$

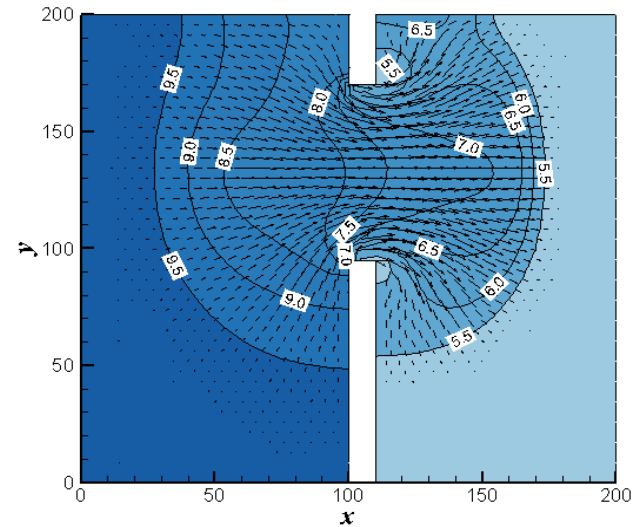
Bu problemde baraj bloğunun $(x, y) \in [100, 110] \times [95, 170]$ parçasının aniden yıkıldığı varsayılarak suyun bu 75 metre genişliğindeki açıklıktan sağa doğru yayılımı incelenmektedir. Grafiklerde h_0 ve h_1 derinliklerinin iki farklı durumu için $t = 7.2$ saniye sonunda elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Zamanda adım aralığı belirlenirken kararlılık sabiti $CFL = 0.9$ olarak alınmıştır.

İlk sonuçlar başlangıç derinlikleri $h_0 = 10$ m ve $h_1 = 5$ m alınarak elde edilmiştir. Bu durum sağ taraf ıslak zemin örneğine karşılık gelmektedir. Şekil 9'da 3B su yüzeyi profili verilmiştir. Suyun hızlanarak h_0 bölgesinden h_1 bölgesine doğru geçtiği ve özellikle 75 metrelik açıklığın çevresinde h_0 seviyesinin azalırken h_1 seviyesinin belirgin şekilde arttığı gözlenmektedir. Şekillerde yıkımdan sonra kalan baraj parçaları boşluk olarak temsil edilmiştir. Şekil 10'da da iki boyutta su derinliğinin izdüşümü hız vektörleriyle birlikte

sunulmuştur. Barajın sağında açık mavi rengin koyulaşması ve hız vektörlerinin boylarının açıklık yakınında büyük olması (Şekil 10) suyun açıklıktan hızlanarak aktığını ve barajın sağ yanındaki su seviyesi yükselirken sol yanındaki su seviyesinin alçaldığını gösterir.



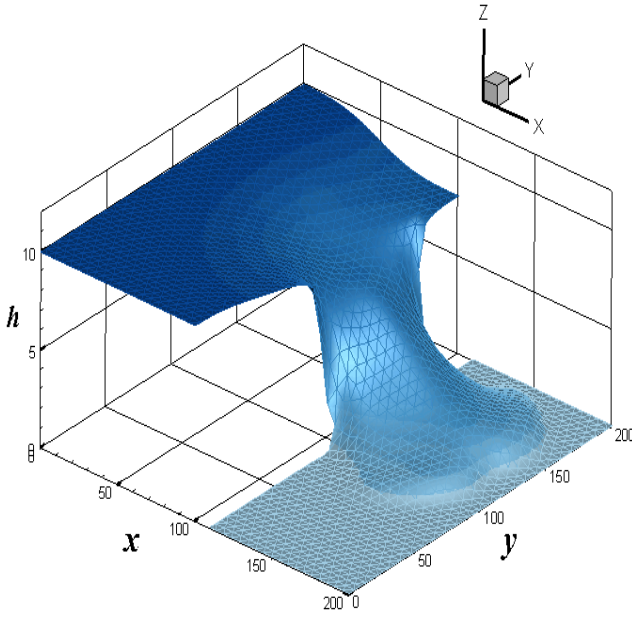
Şekil 9. $h_0 = 10$ m ve $h_1 = 5$ m ve $t \approx 7.2$ sn için su yüzeyi profili (Water surface profile for $h_0 = 10$ m, $h_1 = 5$ m and $t \approx 7.2$ s)



Şekil 10. $h_0 = 10$ m ve $h_1 = 5$ m ve $t \approx 7.2$ sn için su yüzeyi derinlik konturları ve hız vektörleri (Water surface elevation contours and velocity vectors for $h_0 = 10$ m, $h_1 = 5$ m and $t \approx 7.2$ s)

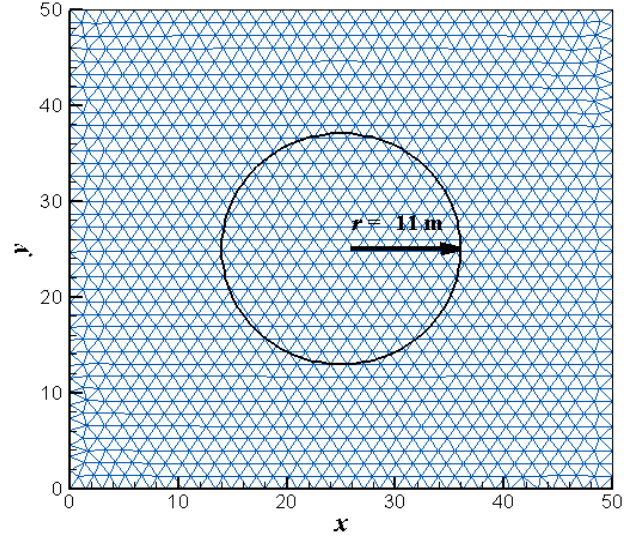
Şekil 11 ve 12' de ise $h_0 = 10$ m ve $h_1 = 0.1$ m sağ taraf neredeyse kuru zemin durumu incelenmiştir. İlk durumdakine benzer şekilde suyun derinliğinin ve hız büyüklüklerinin mansapta artarak yayıldığı ve neredeyse kuru olan sağ tarafta su seviyesinin hızla arttığı açıkça izlenmektedir. Sonuçlar literatürdeki mevcut sonuçlarla tutarlı

olup, yeni yazılan kodun avantajlarını ve çalışırılığını doğrulamaktadır.

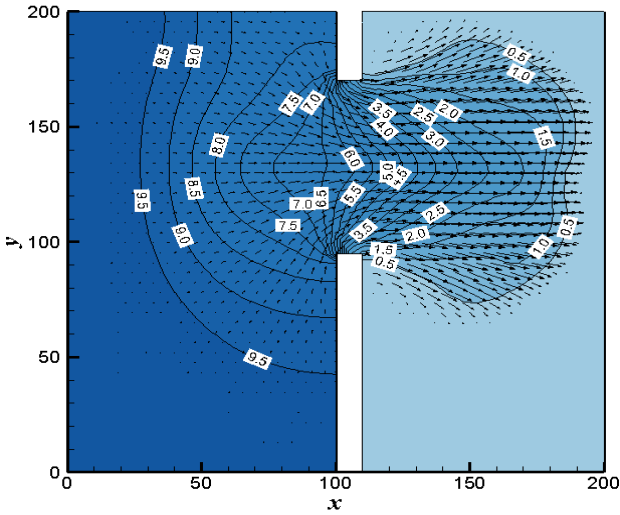


Şekil 11. $h_0 = 10$ m ve $h_1 = 0.1$ m ve $t \approx 7.2$ sn için su yüzeyi profili (Water surface profile for $h_0 = 10$ m , $h_1 = 0.1$ m and $t \approx 7.2$ s)

m ve silindirin dışındaki su seviyesi de $h_1 = 1$ m verilir. Silindirik barajın kalınlığı ihmal edilmekte ve $t = 0$ anında barajın anlık kaldırılmasından sonraki suyun yayılımı ve derinlik profili incelenmektedir.



Şekil 13. Dairesel baraj yıkılma problemi için akım bölgesi ve çözüm örgüsü (Flow domain and mesh for circular dam break problem)

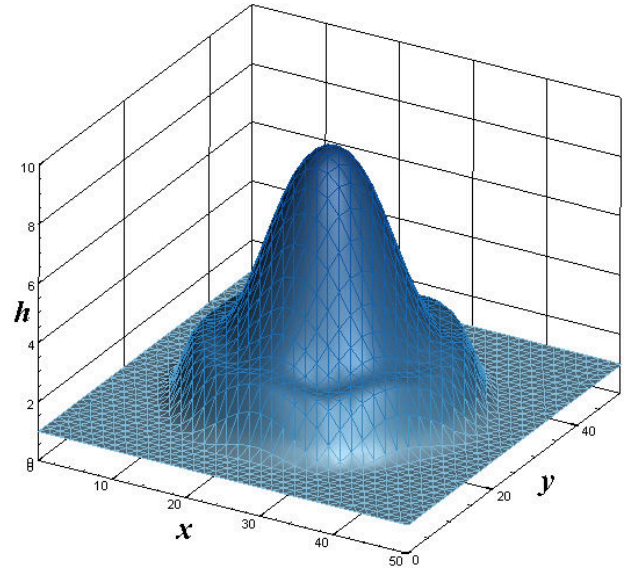


Şekil 12. $h_0 = 10$ m ve $h_1 = 0.1$ m ve $t \approx 7.2$ sn için su yüzeyi derinlik konturları ve hız vektörleri (Water surface elevation contours and velocity vectors for $h_0 = 10$ m , $h_1 = 0.1$ m and $t \approx 7.2$ s)

8.2. Dairesel Baraj Yıkılma Problemi (Circular Dam Break Problem)

Diğer bir baraj yıkılma test durumu ise Alcrudo ve Garcia-Navarro'nun [22] çalıştığı dairesel bir barajın yıkılma modelidir. Problem 50×50 m²'lik kare bir bölge üzerinde tanımlanır. Bölgenin merkezine, 11 m yarıçaplı silindirik bir duvar (baraj) konularak tanım bölgesi silindirin içi ve dışı olmak üzere iki bölgeye ayrılır. Başlangıçta silindirin içindeki durgun suyun seviyesi $h_0 = 10$

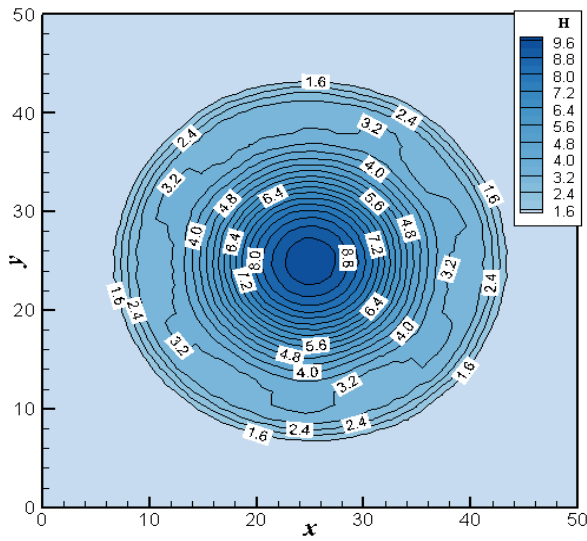
Problemin tanım bölgesi ve üçgen örgüsü Şekil 13'te gösterilmektedir. Hesaplama bölgesi 2477 üçgen bölgeye ayrıştırılmış ve geliştirilen sayısal model sonuçları vermek üzere çalıştırılmıştır. Mevcut çalışmalarla [12, 22] karşılaştırılabilmesi için barajın kaldırılmasından $t = 0.69$ sn sonraki sayısal sonuçlar verilmiştir (Şekil 14 ve 15).



Şekil 14. Dairesel baraj yıkılma modelinde $t \approx 0.69$ sn için su yüzeyi profili (Water surface profile of circular dam break problem at $t \approx 0.69$ s)

Şekil 14'te su yüzeyinin 3B profili sergilenmektedir, ayrıca Şekil 15'te de su derinliğinin eş yükselti konturlarını izlemek

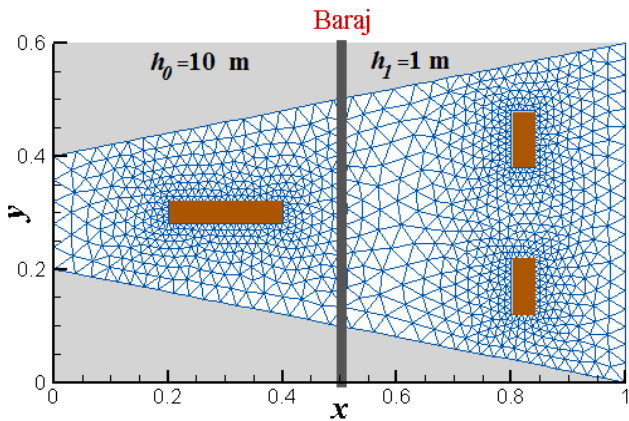
mümkündür. Sonuçlar özellikle Anastasiou ve Chan'ın çalışmasıyla [12] karşılaştırıldığında daha az hücre (1/3'ü kadar sayıda üçgen) ile daha doğru profiller elde edildiği gözlenmektedir.



Şekil 15. Dairesel baraj yıkılma modelinde $t \approx 0.69$ sn için su yüzeyi derinlik konturları (Water surface elevation contours at $t \approx 0.69$ s)

8.3. Üç Adalı Parabolik Baraj Yıkılma Problemi (Parabolic Dam Break Problem with Three Islands)

Bu problem iki parabolik kolun tam ortasına yerleştirilmiş bir barajın yıkılması şeklinde idealize edilmiştir [23]. Akım bölgesi, üçgen çözüm örgüsü ve başlangıç derinlikleri Şekil 16'da verilmiştir. Ada çevrelerinde sıklaşan çözüm örgüsü 1983 tane üçgen hacimden oluşur.

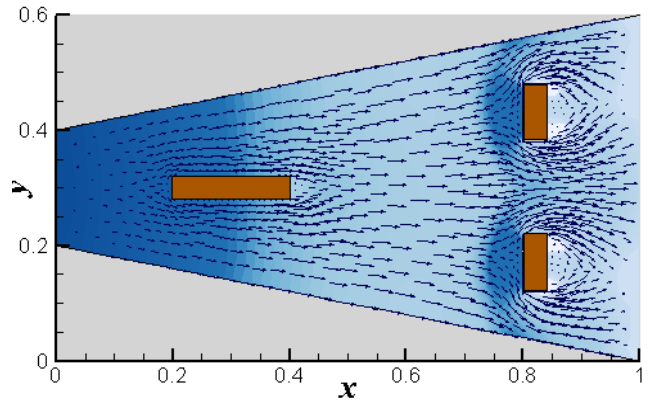


Şekil 16. Üç adalı parabolik baraj yıkılma problemi için akım bölgesi ve çözüm örgüsü (Flow domain and mesh grid for parabolic dam break problem with three obstacles)

Akım alanında baraj öncesinde 1 tane ve baraj sonrasında 2 tane olmak üzere toplam 3 dikdörtgen adacık kurgulanmıştır. Böylece SAD çözümlerinin

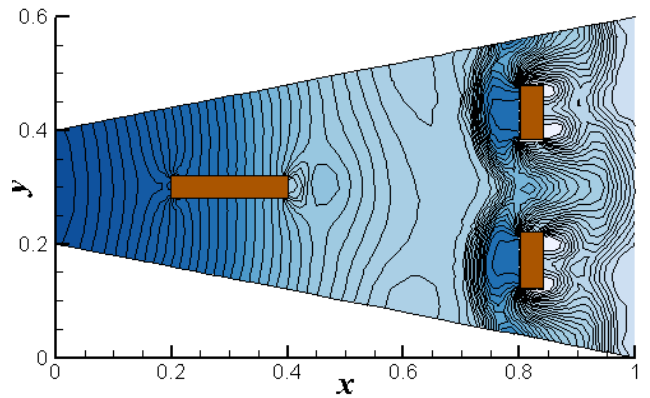
engel yüzeylerinde ve etrafında nasıl şekillendiği incelenecektir.

Şekil 17'de $t = 0.05$ saniyedeki derinlik ortalamalı hız vektörleri ve su yüzeyi izdüşümü gösterilmiştir.



Şekil 17. $t = 0.05$ sn için hız vektörü profili (Velocity field for $t = 0.05$ s)

Engeller öncesinde su seviyesinin yükseldiği (koyu mavi) ve engeller sonrasında seviyenin alçaldığı (açık mavi) açıkça gözlenmektedir. Ayrıca vektör boylarının uzunluğu hızların arttığı bölgeleri ve vektörlerin yoğun olduğu yerler de (engel çevreleri gibi) suyun hızlı akarak girdapların oluştuğu bölgeleri işaret etmektedir. Şekil 18'de ise yine $t = 0.05$ sn anında derinlik konturları çizilmiştir. Bu zaman diliminde elde edilen sayısal sonuçların mevcut çözümlerle [23] uyumlu olduğu görülür.

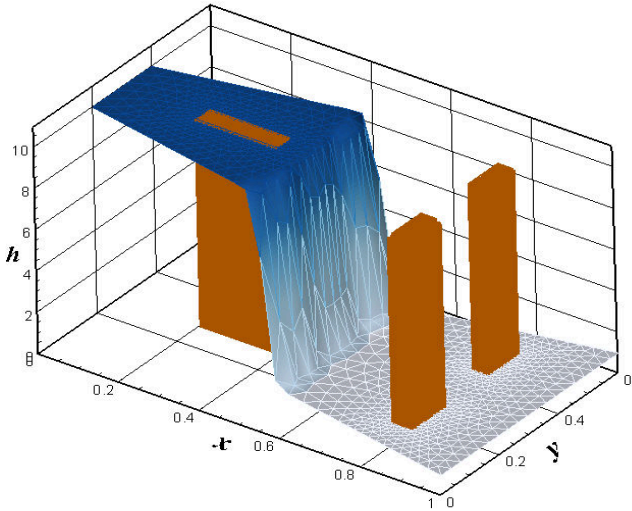


Şekil 18. Derinlik konturları (Depth contours)

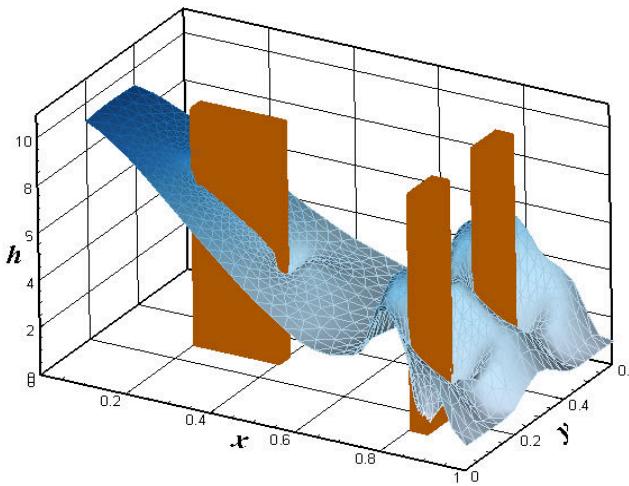
Dikkat edilecek olursa tanım bölgesinde ada çevrelerindeki üçgen sayısı diğer kısımlara göre daha fazladır. Yerel olarak kontrol hacimlerin artırılabilmesi sırasız ağırlıklı ağa göre önemli bir üstünlüğüdür. Akım özellikle bu bölgelerde ani değişimler sergilemektedir ve bu değişimlerin hassas bir şekilde zamandan da tasarruf ederek hesaplanması yöntemine büyük katkı sağlar. Yani bölgenin sadece gerekli görülen yerlerinde üçgen

sayısının artırılmasıyla, hesaplamalardaki işlem sayısı bir anda katlanarak artmamış olur.

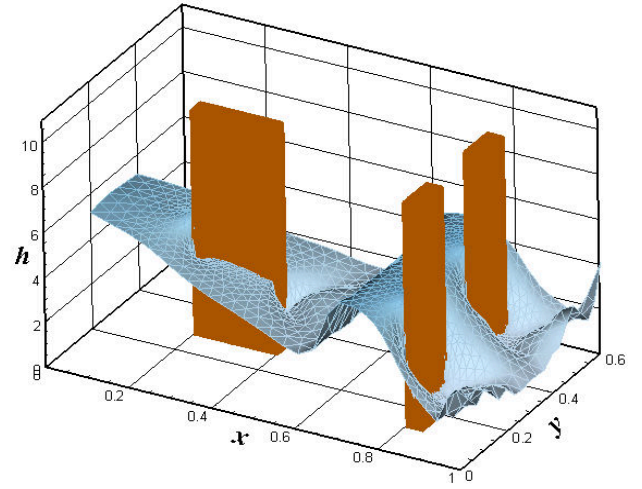
Şekil 19, 20 ve 21’de farklı zaman dilimlerinde su yüzeyinin ada çevrelerindeki 3-boyutlu görüntüsü verilmiştir. Baraj kaldırıldıktan sonra hızlanarak akan suyun mansaptaki ada önlerinde yükseldiği ve adaların yanlarında ve arkasında döngüler oluşturarak daha alçak bir seviyede ilerlediği görülmektedir.



Şekil 19. $t \approx 0.0005$ sn için su yüzeyi (Water surface at $t \approx 0.0005$ s)

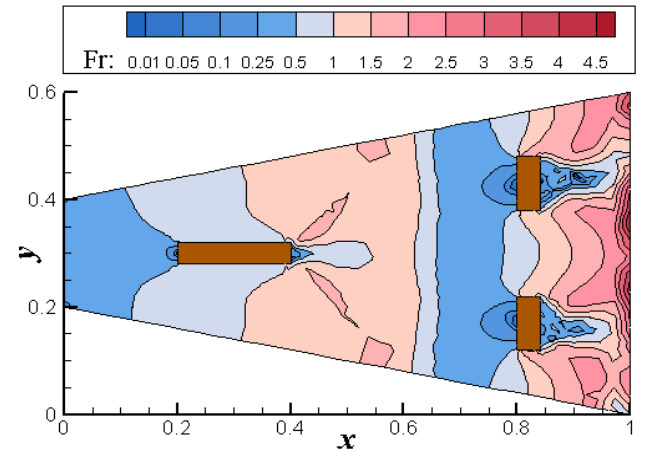


Şekil 20. $t = 0.05$ sn ‘de su yüzeyi (Water surface at $t = 0.05$ s)



Şekil 21. $t \approx 0.1$ sn’de su yüzeyi (Water surface at $t \approx 0.1$ s)

Bunlara ek olarak $t \approx 0.1$ sn sonrasında Froude sayısının, F_r , değişimi incelenmiştir (Şekil 22). Böylece kritik altı ($F_r < 1$), kritik ($F_r = 1$) ve kritik üstü ($F_r > 1$) akım bölgelerini belirlemek mümkündür. Akım engel yanlarında ve arkalarında çoğunlukla kritik üstü (pembe boyalı alanlar) ve engel önlerinde de kritik altı (mavi ve tonları) davranır. Geliştirilen yazılımın kritik altı ve kritik üstü geçişlerini başarılı bir şekilde çözebilmesi köprü ayakları etrafında oluşan akım türlerinin çalışılmasında önemli bir avantaj olacaktır.



Şekil 22. $t \approx 0.1$ sn için Froude sayısı değişimi (Froude number change at $t \approx 0.1$ s)

9. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sığ akım denklemlerinin ‘Sonlu Hacim bazlı Toplam Salınım Azaltma özellikli Ağırlık Ortalamalı Akı (TVD-WAF) yöntemi ile Sırasız Ağda’ sayısal çözümü için özgün bir bilgisayar yazılımı geliştirilmiştir. Yazılım ölçüt test

problemlerinde koşut olarak elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Bu çalışmayla ‘sonlu hacim ağırlık ortlamalı akı’ yönteminin ‘sırasız ağda’ uygulanabilmesi için yeni teknikler önerilmiştir. Öncelikle mevcut çalışmalar derlenerek SAD’nin sayısal çözümü için zamanda ve uzayda yüksek mertebeden doğruluklu, süreksizliklerin hesaplanmasına olanak veren ve karmaşık geometrilere uygulanabilme esnekliğine sahip bir yöntem belirlenmiştir. 2-boyutlu SAD’nin hiperbolik yapısı gereği çözümü karmaşık ve çok aşamalı işlem gerektirir. Sonlu hacim yönteminin ‘sırasız ağ’ üzerinde uygulanması ile değişik geometrilere uygulanabilme esnekliği kazandırılmıştır. Buna ek olarak ara-yüzlerdeki şok ve temas dalgalarını yakalayan Riemann çözücülerden faydalanılmıştır. HLLC Riemann çözücüsünün kullanılmasıyla uzayda ikinci derece doğruluklu çözümün ilk adımı oluşturulmuştur. Ayrıca ara-yüz akıları için kendi doğasında ikinci mertebeden doğruluklu WAF yöntemi uygulanmıştır. Ancak HLLC-WAF’ın birlikte kullanılması yöntemin doğruluk derecesini artırmakla beraber süreksizlik noktalarında kararsızlığa ve çözümde istenmeyen salınımlara neden olmaktadır. Kararlı akı çözümleri için WAF’ın ‘akı sınırlayıcı fonksiyonları’ndan yararlanılmış ve salınımları sönmek için de WAF yöntemi ‘toplam salınım azaltma (TVD)’ yaklaşımı ile birleştirilmiştir. Böylece, sayısal salınımlar giderildiği gibi, uzayda 2. dereceye yakın doğruluk kazanılmıştır.

Literatürde HLLC-TVD-WAF üçlemesinin kullanımı sıralı ve sırasız ağda mevcuttur. Ancak akı sınırlayıcı fonksiyonu belirleyen ‘ r ’ parametresinin (rüzgar yönlü değişimin yerel değişime oranı) sırasız ağda belli bir tanımı bulunmamaktadır [14, 24]. Bu çalışmada ‘ r ’ parametresinin sırasız üçgen çözüm örgüsünde geçerli bir tanımı (Bölüm 6) ilk kez verilmiş ve bu tanıma 3 aşamalı ara-yüz gradyan yaklaşımının eklenmesiyle uzayda 2. mertebeden doğruluk korunmuştur. Zamanda ikinci derece doğruluk ise iki aşamalı Runge-Kutta yöntemiyle sağlanmıştır.

Sayısal hesaplama yükünü azaltmak bakımından ‘rotasyonel değişmezlik özelliği’ kullanılarak normal akı sadece birinci bileşeni yardımıyla hesaplanmıştır. Ayrıca sınır koşullarının getirdiği fiziksel sonuçlar yardımıyla sınır yüzeylerdeki akı hesabında da işlemler en aza indirgenmiştir. Bunun dışında sırasız ağ ile çalışılmasının bir getirisi olarak hücre sayısının belli yerel



bölgelerde artırılabilmesi (grid clustering) hassas çözüm gerektiren bölgeler için çözünürlüğü artırırken, diğer bölgelerde daha az hücre ile hesap zamanından tasarruf sağlamaktadır. Geliştirilen sayısal çözüm yönteminin sunduğu yüksek sayısal kararlılık sonucu Courant sayısı değeri 0.9 gibi yüksek bir değer olarak seçilebildiğinden daha büyük zaman adımları kullanabilmek ve böylece yakınsamayı hızlandırmak mümkün olmuştur.

Sunulan ölçüt problem çözümlerinde gözlenen başarı, gerek iyileştirilen sayısal yöntemin ve gerekse geliştirilen bilgisayar yazılımının ‘doğruluğunu’ ve ‘uygulanabilirliğini’ ortaya koymaktadır. Hesaplanan hız ve su derinlikleri referans değerlerle uyumlu olup akımın zamanda gelişimini doğru olarak verebilmektedir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] H.Ö. Çağatay and S. Kocaman, "Baraj yıkılması taşkın dalgalarının mansapta oluşturacağı su yüzü profillerinin incelenmesi," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 24, no. 1, pp. 99-110, 2009.
- [2] O. Sönmez and F. Demir, "Ağva ilçe merkezine ait taşkın yayılım haritalarının ve mevcut binaların taşkın su seviyelerinin tespiti," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 21, no. 2, pp. 105-112, 2017.
- [3] Ş. Elçi, G. Tayfur, İ. Haltaş, and B. Kocaman, "Baraj yıkılması sonrası iki boyutlu taşkın yayılımının yerleşim bölgeleri için modellenmesi," *İMO Teknik Dergi*, vol. 28, no. 3, pp. 7955-7975, 2017.
- [4] B. N. İşcen, N. Öktem, B. Yılmaz, and İ. Aydın, "Sığ akım denklemlerinin hidrolikte kullanılması üzerine değerlendirmeler," *İMO Teknik Dergi*, vol. 28, no. 1, pp. 7747-7764, 2017.
- [5] E. F. Toro, *Shock-capturing methods for free-surface shallow flows*, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2001, pp. 15-24.
- [6] E.F. Toro, *Riemann solvers and numerical methods for fluid dynamics*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [7] E.F. Toro, "Riemann problems and the WAF method for solving the two-dimensional shallow water equations," *Philosophical Transactions: Physical Sciences and*

- Engineering*, vol. 338, no. 1649, pp. 43-68, 1992.
- [8] S. J. Billett and E. F. Toro, "On WAF-type schemes for multidimensional hyperbolic conservation laws," *Journal of Computational Physics*, vol. 130, pp. 1-24, 1997.
- [9] C. Zoppou and S. Roberts, "Numerical solution of the two-dimensional unsteady dam break," *Applied Mathematical Modelling*, vol. 24, pp. 457-475, 2000.
- [10] D.H. Kim, Y.S. Cho, A.M. ASCE, and W.G. Kim, "Weighted averaged flux-type scheme for shallow-water equations with fractional step method," *Journal of Engineering Mechanics*, 2004, 130(2): 152-160, vol. 130, no. 2, pp. 152-160, 2004.
- [11] W.D. Guo, J.S. Lai, and G.F. Lin, "Finite-volume multi-stage schemes for shallow-water flow," *International Journal for Numerical Methods in Fluids 2008*; 57:177-204, vol. 57, pp. 177-204, 2008.
- [12] K. Anastasiou and C.T. Chan, "Solution of the 2D shallow water equations using the finite volume method on unstructured triangular meshes," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 24, pp. 1225-1245, 1997.
- [13] D. Pan and J. Cheng, "A second-order upwind finite-volume method for the Euler solution on unstructured triangular meshes," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, vol. 16, pp. 1079-1098, 1993.
- [14] J. Hou, Q. Liang, H. Zhang, and R. Hinkelmann, "An efficient unstructured MUSCL scheme for solving the 2D shallow water equations," *Environmental Modelling & Software*, vol. 66, pp. 131-152, 2015.
- [15] T.H. Yoon, F. ASCE, and S.K. Kang, "Finite volume model for two-dimensional shallow flows on unstructured grids," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 130, no. 7, pp. 678-688, 2004.
- [16] C. Zoppou, M. ASCE, and S. Roberts, "Explicit schemes for dam-break simulations," *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 129, pp. 11-34, 2003.
- [17] P.O. Persson and G. Strang, "A simple mesh generator in matlab," *SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics*, vol. 46, no. 2, pp. 329-345, 2004.
- [18] H.K. Versteeg and W. Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method*, Pearson: Prentice Hall, 2007, pp. 321-329.
- [19] S. Tu and S. Aliabadi, "A slope limiting procedure in discontinuous galerkin finite element method for gasdynamics applications," *International Journal for Numerical Analysis and Modeling*, vol. 2, no. 2, pp. 163-178, 2005.
- [20] T. Hino, L. Martinelli and A. Jameson, "A finite volume method with unstructured grid for free surface flow simulations," in *Sixth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, Tokyo, Japan, 1993.
- [21] R.J. Fennema and M.H. Chaudhry, "Explicit methods for 2D transient free-surface flows," *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 116, pp. 1013-1034, 1990.
- [22] F. Alcrudo and P. Garcia-Navarro, "A high-resolution godunov-type scheme in finite volumes for the 2D shallow-water equations," *International Journal for Numerical Methods in FLuids, VOL. 16, 489-505 (1993)*, vol. 16, pp. 489-505, 1993.
- [23] L.A. Monthe, F. Benkhaldoun, and I. Elmahi, "Positivity preserving finite volume Roe schemes for transport-diffusion equations," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 178, pp. 215-232, 1999.
- [24] Youssef Loukili and Azzeddine Soulaïmani, "Numerical tracking of shallow water waves by the unstructured finite volume WAF Approximation," *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 8, pp. 1-14, 2007.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 13-10-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 13-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.343562	

Betonların Güçlendirilmesinde FRP Kompozitlerin Hibrit Olarak Kullanımının etkisi

Ali Sarıbiyik¹

ÖZ

Bu çalışmada, standart silindir boyutlarda üretilen betonların Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) kompozitler ile güçlendirilmesinde elyaf türü, sargı katman sayısı ve farklı tür elyafın hibrit olarak kullanımının etkileri araştırılmıştır. Aynı şartlar altında üretilmiş, ortalama 30,25 MPa basınç dayanımına sahip betonlar tek doğrultulu cam ve karbon elyaf kumaşlarla enine bir, iki, üçer kat sarılarak ve ayrıca cam ve karbon kumaş hibrit olarak sarılarak güçlendirilmiştir. Beton numuneler aksel basınç testi altında sabit hızlı yükleme ile test edilmiştir. Elyaf türünün, sargı katman sayısının ve hibrit kullanımının beton davranışına etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Test sonuçları incelendiğinde, sargı katman sayısı arttığında betonun basınç dayanımı ve deformasyon kabiliyetinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca hibrit güçlendirmenin tekil güçlendirmeye göre daha etkili olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: CFRP, GFRP, hibrit, güçlendirme, beton,

Effect of Using FRP Composites as Hybrid in the Strengthening of Concretes

ABSTRACT

In this study, the effect of fiber type, number of layers and hybrid use of different type fibers on concrete behavior was investigated in standard cylinder concretes strengthened by Fiber Reinforced Polymer (FRP) composites. Specimens were produced in average of 30.25 MPa compressive strength with standard cylinder sizes and were strengthened with unidirectional glass fiber fabric, unidirectional carbon fiber fabric and hybrid use of glass and carbon fiber fabrics. Concrete members were tested under axial compressive loads. The effect of fiber type, number of layers and hybrid use of different type fibers on concrete behavior was evaluated comparatively. The test results have indicated that concrete compressive strength and deformation capacities increase when the number of wrap layers increase. It is also shown that hybrid strengthening is more effective than individual strengthening.

Keywords: CFRP, GFRP, hybrid, strengthening, concrete,

¹ SAÜ, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 54187 Sakarya, Türkiye, e-mail: alisaribiyik@sakarya.edu.tr

1. GIRIŞ (INTRODUCTION)

Meydana gelen son depremlerden sonra yapılan araştırmalar ve edinilen bilgiler doğrultusunda inşa edilen betonarme yapıların önemli bir kısmının birçok açıdan güçlendirilmesi gerekmektedir[1]–[11]. Deprem dayanımı düşük bina sayısının fazlalığı, bu binaların halen kullanılıyor olmaları, yapım yöntem ve tekniklerinin farklılığı gibi nedenlerle, her yapı türü için uygun onarım ve güçlendirme yöntemlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar halen devam etmektedir. Bu durumlar dikkate alındığında yapıların yenilenmesi ya da güçlendirilerek depreme dayanıklı hale getirilmesi öngörülmektedir. Türkiye’deki meydana gelen depremler sonrasında mevcut yapı stoku incelendiğinde betonarme binaların geneline yakınında kolon etriyelerinin yeterli sıklıkta olmaması, etriye kancalarının uygunsuzluğu, kullanılan betonların ön görülen basınç dayanımlarını sağlamaması, kolon bindirme boyunun yeterli olmaması vb. nedenler ile depremde oluşan hasarların ciddi boyutlara ulaştığını araştırmacılar ortaya koymuştur[1]–[11]. Hasar gören veya görmesi muhtemel kolonların onarım ve güçlendirilmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kolonların betonarme ile mantolanması kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Ancak bu yöntemler ile yapılan güçlendirmelerde boyut artışı nedeni ile kullanılan alan kayıpları, yapı ağırlığının artması, güçlendirme sırasında yapının kullanımının mümkün olmaması ve yapı temel sisteminde ilave düzenlemelere ihtiyaç duyulması gibi olumsuz yönler de bulunmaktadır. Yapı ağırlığını artırmayan, kolay ve hızlı uygulanabilen, elemanların taşıma kapasitelerini önemli ölçüde artıran, güçlendirme sırasında yapının kullanımına olanak sağlayan Elyaf Takviyeli Polimer (FRP) kompozitler gibi alternatif güçlendirme elemanlarının kullanımı ve üzerinde yapılan çalışmalar uzun yıllardır devam etmektedir.

FRP kompozitler, betonarme yapı elemanlarının onarım ve güçlendirilmesinde uzun yıllardır kullanılmaktadır. Betonarme kolonlar FRP kompozitler ile sarılarak etkili bir şekilde güçlendirilebilmektedir. Kolonların FRP kompozitler ile güçlendirilmesinde yaygın olarak karbon, buna nispeten daha az oranda Cam, Aramid FRP kompozitler kullanılmaktadır. FRP kompozitlerin tercih edilmesinde, dayanım, dayanıklılık, şekil değiştirme kapasitesi,

ekonomiklik gibi faktörlere etkili olmaktadır. Yapılan birçok çalışma FRP kompozitler ile güçlendirilen betonarme kolonların yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymuştur [12]–[27]. FRP kompozitler ile güçlendirme betonarme kolonların süneklik kapasitelerini[18], [22], [28], [29], [30] basınç dayanımlarını[12], [23], [29], [31]–[37], ve boyuna donatı bindirme boyunun yetersiz olduğu durumlarda donatı kenetlenme dayanımlarını artırmaktadır[38]–[41]. FRP ile güçlendirilmiş kolonların, aşırı koşullarda (donma ve yangın) da iyi performans sergilemiş [26], hesap yöntemleri ve davranış modelleri üzerindeki çalışmalar gelişen teknoloji ve değişen malzemeler ile birlikte güncellenerek devam etmektedir [13], [27], [42]–[45]. Düşük dayanımlı betonlar ile üretilen basınç elemanları FRP kompozitler ile etkili bir şekilde güçlendirilebilmektedir [18], [20], [46]. Kolonlar üzerine yapılan çalışmaların bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Eid ve Paultre[12] betonarme kare/dikdörtgen ve silindir kolonları CFRP kompozitlerle güçlendirmişler ve basınç testi altında davranışlarını inceleyerek gerileme-deformasyon modeli sunmuşlardır. Shin ve Bassem[14], basınç dayanımları 47,3 MPa ve 39,2 MPa arasında değişen standart silindir betonlar üretmişler, beton yan yüzeylerini çelik tel ve GFRP ile sararak güçlendirme çalışması yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada çelik tel sargı ve GFRP sargının birlikte kullanıldığı betonların dayanımlarında ve sünekliğinde önemli artışların olduğunu tespit etmişlerdir. GFRP ile birlikte çelik tel sargı ile de betonların güçlendirilebileceği vurgulamışlardır. Lam ve arkadaşları [25], ortalama 41,1 MPa ve 38,9 MPa basınç dayanımına sahip silindir betonları CFRP kompozitler ile güçlendirerek sabit hızlı ve tekrarlı yüklemeler altında test etmişlerdir. Test sonucunda gerilme-şekil değiştirme eğrileri arasında ihmal edilebilecek düzeyde bir fark olduğunu tespit etmişlerdir. Hua ve arkadaşları [33], 41,1 MPa ve 57,5 MPa basınç dayanımına sahip kare kesitli kolonları CFRP ile kısmi sarma metodu kullanarak güçlendirmişlerdir. Yapılan çalışmada sonucunda kolonların dayanım ve sünekliğini önemli ölçüde artırdığını tespit etmişlerdir. Kolonların sadece zayıf bölgelerini güçlendirerek aşırı maliyetten ve zaman israfından kazanç sağlanabileceğini ortaya koymuşlardır. Sarıbıyık ve arkadaşları [47], 20,82 basınç dayanımına sahip betonları CFRP ve GFRP kompozitler ile farklı katmanlarda sararak

güçlendirmiş ve tekrarlı ve tekdüze yükleme altında test etmişlerdir. Güçlendirilmiş betonlar tekrarlı ve tekdüze yükleme durumunda aynı performansı sergilemiş ve bir kat CFRP ile güçlendirilen betonların dayanımına iki kat GFRP ile güçlendirilerek erişilmiştir. Karbona göre cam elyafı daha ekonomik güçlendirme sonuçları ortaya konulmuştur. FRP kompozitler ile başka malzemeleri birlikte (hibrit) kullanarak betonarme elemanların onarım ve güçlendirilmesinde daha etkili ve ekonomik çözümler üzerinde çalışmalar devam etmektedir [48].

Yapılan birçok çalışmada farklı boyutlardaki betonarme kolonlar/betonlar farklı tür ve özelliklerdeki FRP kompozitler kullanılarak güçlendirilmiştir. Ancak eşit veya yakın dokuma kalınlıklarına sahip FRP kompozitlerin eş zamanlı karşılaştırmaları ve özellikle hibrit kullanımının yetersiz olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada, ortalama 30,25 MPa basınç dayanımına sahip betonların CFRP ve GFRP kompozitler ile güçlendirilmesinde hibrit kullanımının yanında elyaf türü, sargı katmanının etkileri karşılaştırılmalı olarak analiz edilerek, ekonomiklik ve hibrit kullanımının etkinliği ortaya konulmaktadır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Test numuneleri ve araştırma parametreleri (Test specimens and research parameters)

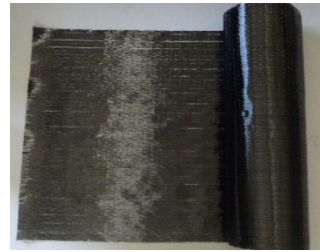
Deneysel çalışmada 28 adet beton laboratuvar ortamında standart silindir boyutlarda (150 mm çap ve 300 mm yüksekliğinde) üretilmiştir. Dörtlerli gruplara ayrılan betonlar; kontrol betonu (Kontrol), bir, iki, üç kat cam (C) elyaf kumaş sarılarak güçlendirilmiş betonlar sırasıyla C1, C2, C3; bir ve iki kat karbon (K) elyaf kumaş sarılarak güçlendirilmiş betonlar sırasıyla K1, K2; bir kat karbon + iki kat cam elyaf kumaş sarılarak güçlendirilmiş betonlar K1+C2 ile simgelenmiştir. Güçlendirilen betonlar basınç testi ile test edilerek basınç dayanımı ve deformasyon davranışları incelenmiştir. Beton dayanım ve davranışlarına hibrit güçlendirmenin, elyaf türü ve sargı katmanının etkileri karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır.

2.2. Malzemeler (Materials)

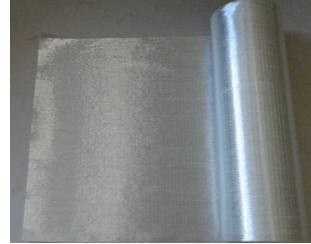
Betonlar CEM IV/B 32, R çimentosu, şebeke suyu, 0-4 mm doğal kum ve 4-16 mm elek çapında mıcır

kullanılarak üretilmiştir. Karışım oranları agregalar üzerinde elek analizi yapılarak bulunmuştur (%40 kum, %60 mıcır). Su/çimento oranı 0,60 alınarak beton karışım hesapları yapılmış ve betonlar laboratuvar ortamında üretilmiştir.

Betonların güçlendirilmesinde karbon elyaf kumaş olarak Sika Wrap -300 C/60 (Şekil 1a) ürünü, cam elyaf kumaş olarak Sika Wrap-430 G/25(Şekil 1b) ürünü ve yapıştırıcı olarak Sikadur 330 çift bileşenli epoksi reçine kullanılmıştır. Tek doğrultulu rulo halinde üretilen cam ve karbon kumaşlar yakın hacim oranlarına sahiptir. Karbon elyaf kumaşın dokuma kalınlığı: 0,166mm, çekme dayanımı: 3900 MPa, çekme elastisite modülü: 230 GPa, kopma uzaması: %1,5; cam elyaf kumaşın dokuma kalınlığı: 0,172mm, çekme dayanımı: 2300 MPa, çekme elastisite modülü: 76 GPa, kopma uzaması: %2,8; epoksi reçinenin çekme dayanımı: 30 MPa, çekme elastisite modülü: 4,5 GPa, kopma uzaması: %0,9 olarak ürün kataloğundan alınmıştır.



a. Karbon kumaş



b. Cam kumaş



c. Epoksi reçine

Şekil 1. Elyaf kumaşlar ve çift bileşenli epoksi reçine (Fiber fabrics and bicomponent epoxy resin)

2.3. Numune üretimi ve deney düzeneği (Specimen production and test setup)

Gerekli dayanım kazanma sürecini tamamlayan betonlar kür havuzundan çıkarılarak

güçlendirilmeye hazırlanmıştır. Basınç testinde yüklerin eşit dağılması için beton basınç yüzeylerine kükürt ve grafit tozu kullanılarak başlık yapılmıştır. Betonlar yeterli kuruluğa erişinceye kadar beklenmiş ve betonların sarılma yüzeyleri tel fırça ile fırçalanmış, yapışmaya engel teşkil edecek bozukluklardan arındırılarak güçlendirilmeye hazır hale getirilmiştir.

Çift bileşenli epoksi reçinesi ve sertleştirici, ürün kataloğunda belirtilen oranlarda karıştırılarak hazırlanmış, rulo ve fırça yardımıyla beton yan yüzeylerine kuru yer kalmayacak şekilde bir kat sürülmüştür. Uygun ebatlarda kesilerek hazırlanan karbon ve cam elyaf kumaşlar beton yan yüzeylerine enine farklı katmanlarda sarılmıştır. Beton yüzeyine sarılan kumaşlar üzerine bir kat reçine sürülerek kumaşlar reçineye doyurulmuştur. Ürün şartnamesini de dikkate alarak 130 mm bindirme boyu ile kumaşların yükleme sırasında beton yüzeyinden sıyrılması önlenmiştir. Güçlendirme işlemi tamamlanan betonlar epoksi reçinenin sertleşme sürecini tamamlayıncaya kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir (Şekil 2.)

Karbon ve cam FRP kompozitler ile yapılan deney sonuçları incelenerek hibrit güçlendirmeye karar verilmiştir. Karbon FRP ile yapılan güçlendirmede birinci, cam FRP'de ise ikinci ve üçüncü kat güçlendirmede en iyi performans alınmıştır. Ayrıca karbon elyafın deformasyon kabiliyetinin az olmasını da dikkate alarak betonlar önce bir kat karbon kumaş ile sarılmış üzerine iki kat cam kumaş ile sarılarak güçlendirilmiştir.



Şekil 2. Güçlendirilmiş beton numuneler (Strengthened concrete Specimens)

Basınç test cihazının yükleme hız ayarları ($0,5 \pm 0,2$ MPa/sn.) yapılmış ve haricen takılan uzunluk ölçüm cihazı, test cihazının düşey doğrultuda hareket eden düzlemine yerleştirilmiştir. Uzunluk ölçüm cihazı ile zamana bağlı olarak yüke karşılık

gelen boy değişimleri ve deney cihazından alınan yük değerleri, aynı anda veri kaydediciler üzerinden bilgisayar ortamına aktarılmıştır. (Şekil 3). Betonlar basınç test cihazında kırılma gerçekleşinceye kadar sabit hızlı yükleme ile basınç testine tabi tutulmuştur.



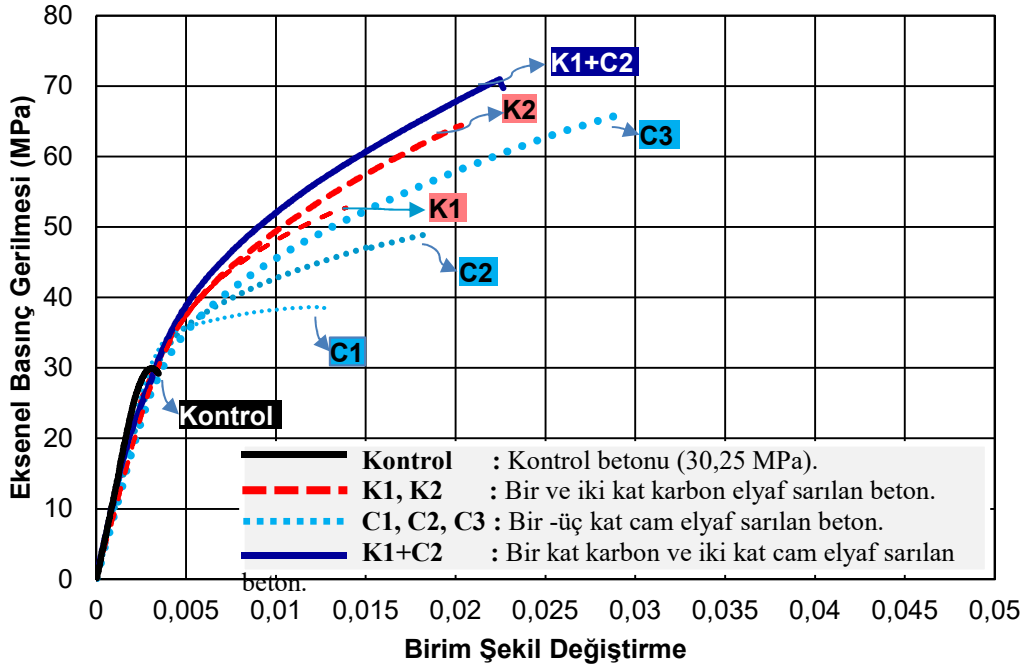
Şekil 3. Deney düzeneği ve veri aktarımı (Experiment setup and data transfer)

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Eksenel doğrultuda ve sabit hızlı yükleme altında test edilen betonların ortalama test sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. Numune gruplarının aksenal gerilme ve birim şekil değiştirme grafikleri hesaplanarak çizilmiş, numune gruplarını temsil eden ortak grafikler Şekil 4'te sunulmuştur.

Tablo 1. Numunelerin ortalama test sonuçları (Average test results of the Specimens)

Numuneler	Eksenel Basınç Gerilmesi (MPa)	Birim Şekil Değişirme (mm/mm)
Kontrol betonu	30,25	0,0032
C1	37,40	0,0120
C2	50,70	0,0200
C3	64,70	0,0290
K1	51,85	0,0130
K2	64,00	0,0200
K1+C2	73,10	0,0230



Şekil 4. Numunelerin örnek basınç gerilmesi ve şekil değişirme grafikleri (Compressive stress and strain charts of specimens)

Test sonuçları incelendiğinde; beton numune grupları kendi içerisinde benzer davranış gösterdiği, sarım sayısı arttıkça dayanım ve deformasyon kabiliyetinin de arttığı ancak bu artışın aynı oranda olmadığı ve FRP kompozitler bindirme (130mm) bölgelerinden sıyrılmadığı tespit edilmiştir. FRP kompozitler ile güçlendirilen betonlar son dayanımlarına eriştiklerinde betonların orta bölgelerine yakın yerlerinden FRP kompozitler koparak beton yüzeyinden ayrılmış ve beton orta bölgeden parçalanarak kırılmıştır. Kontrol betonlarının ortalama basınç dayanımı 30,25 MPa, bu dayanıma karşılık gelen birim şekil değişirmesi 0,0032 olarak bulunmuştur (Tablo 1).

Kontrol betonuna kıyasla bir kat cam elyaf kumaşla sarılarak güçlendirilen betonların (C1)

basınç dayanımındaki artış %23,6, şekil değişirme kapasitesinde artış 3,3 kat; iki kat cam kumaş ile güçlendirilen betonların (C2) basınç dayanımındaki artış %67,6, şekil değişirme kapasitesindeki artış 6,25 kat olarak hesaplanmıştır. Üç kat cam kumaş ile güçlendirilen numunelerin (C3) basınç dayanımında %114, şekil değişirme kapasitesinde 9,1 kat artış olmuştur. Bir kat karbon kumaş ile güçlendirilen betonların (K1) ortalama basınç dayanımındaki artış %71, iki kat karbon kumaş ile güçlendirilen betonların (K2) betonunun basınç dayanımı %112 kat artmış, sırasıyla şekil değişirme kapasiteleri 4 kat ve 6,25 kat artmıştır.

Bir kat karbon + iki kat cam elyaf sarılarak güçlendirilen betonların (K1+C2) basınç

dayanımında %142, şekil değiştirme kapasitesindeki 7,2 kat artış olmuştur.

K1+C2 numuneleri; C3 numunelerine kıyasla %13, K2 numunelerine kıyasla %14 daha yüksek dayanım göstermiştir. Şekil değiştirme kapasitelerinde ise C3 numunesine göre %21 oranında azalma, K2 numunesine göre %15 oranında artış olduğu tespit edilmiştir. Böylece K1+C2 hibrit şeklinde yapılan beton güçlendirme K2 ve C3 e göre basınç dayanımına göre daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Numune sargı sayısının etkisi incelendiğinde bir, iki ve üç kat cam elyaf kumaş ile sarılarak güçlendirilen (C1, C2 ve C3) betonların dayanımında sırasıyla 7,15 MPa, 20,45 ve 34,45 MPa artış olmuştur. İki ve üç kat cam kumaş ile sarılarak güçlendirmede dayanım artış oranı benzer ve bir kata göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ancak C1, C2 ve C3 betonların şekil değiştirme kapasitelerindeki değişim benzer oranlarda olmuştur. K1 ve K2 betonlarının dayanımlarındaki artış sırasıyla 21,6 ve 33,75 MPa'dır. K2 betonundaki dayanım artışı K1 betonlarındaki kadar etkin olmamış iki kat sarımda performans düşmüştür.

FRP kompozitler betonun dağılmasını engelleyerek betona kuşatılmış beton özelliği kazandırmaktadırlar. Betonarme yapılarda enine donatılar (etriyeler) ile kazandırılan kuşatılmış beton özelliğinin FRP kompozitler ile de kazandırılabilceği yukarıda elde edilen sonuçlar ile açıkça gösterilmiştir.

Eksenel basınç altında beton eksenel doğrultuda kısılarken poisson oranı etkisiyle enine doğrultuda şişer ve çatlaklar. Betonarme kolonlarda kullanılan etriye betonun şişmesini engelleyerek betona yanal basınç uygular. Uygulanan bu yanal basınç etkisiyle kuşatılmış betonun dayanımı ve sünekliği artar. FRP kompozitler ile sarılarak güçlendirilmiş betonarme kolonda ise bu kuşatma etkisi FRP kompozitler tarafından sağlanır. Dolayısıyla bu şekilde güçlendirilmiş olan betonarme kolonlar yüksekliği boyunca sürekli olarak kuşatılmış beton davranışı gösterirler.

Etriye adım mesafesi yeterli olmayan kolonların güçlendirilmesinde dışarıdan etriye sarmanın oldukça zahmetli bir işlem olduğu bilinmektedir. Ülkemizde yaygın olarak karşılaşılan bu tür betonarme kolonlar, yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip ve uygulaması oldukça kolay

olan FRP kompozitler kullanılarak etkin bir şekilde güçlendirilebilir.

Yapılan deneysel çalışmalar her ne kadar standart boyutlarda üretilen silindirik betonlarla sınırlı olsa da, elde edilen sonuçlar FRP kompozitlerin beton dayanımı yetersiz ve etriye adım mesafesi standartlara uygun olmayan betonarme kolonların güçlendirilmesinde etkin bir şekilde kullanılabilceğini açıkça ortaya koymuştur. Özellikle etriye mesafesi standartların çok üzerinde olan betonarme kolonların bu bölgedeki betonlarına kuşatma etkisi özelliği kazandırılarak betonun bütünlüğü korunmuş, boyuna donatıların burkulması engellenmiş, düşük dayanımlı betonun dayanımı ve sünekliği artırılmış olacaktır.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, ortalama 30,25 MPa basınç dayanımına sahip standart boyuta silindirik beton numuneler tek doğrultulu karbon ve cam kumaş ile tekil ve hibrit olarak güçlendirilmiş ve test edilmiştir. Yükleme sonucunda FRP kompozitlerin bindirme boylarından sıyrılmadığı, numunelerin orta bölgelerinden lifler koparak betonun yüzeyinden ayrıldığı gözlemlenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre;

1. Beton numune grupları kendi içerisinde benzer davranış gösterdiği, sarım sayısı arttıkça dayanım ve deformasyon kabiliyetinin de arttığı ancak bu artışın aynı oranda olmadığı, kullanılan elyaf türüne göre sargı katmanlarının etkilerinin değişiklik gösterdiği tespit edilmiştir.
2. C1, C2 ve C3 numunelerin iki ve üç kat sarımda dayanım artışı benzer oranlarda ve bir kat sarıma göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Ancak C1, C2 ve C3 betonların şekil değiştirme kapasitelerindeki değişim benzer oranlarda olmuştur. K2 betonundaki dayanım artışı K1 betonlarındaki kadar etkin olmamış iki kat sarımda güçlenme performansı düşmüştür.
3. C3 ve K2 numunelerinin basınç dayanımları benzer olmasına rağmen şekil değiştirme kapasitelerindeki artışın aynı oranda olmadığı, K1+C2 hibrit şekillinde yapılan güçlendirmenin tekil güçlendirmeye (K2 ve

C3) göre dayanım açısından daha etkili olduğu tespit edilmiştir.



4. Betonarme kolonlarda kullanılan etriye, betonun şişmesini engelleyerek betona yanal basınç uyguladığı, bu yanal basınç etkisi kuşatılmış betonun dayanımını ve sünekliğini artırdığı bilinmektedir. Benzer etki FRP kompozitler ile güçlendirilen betonlarda da elde edilmiştir. FRP kompozitler betonun dağılmasını önleyerek betona önemli ölçüde dayanım ve şekil değiştirme kabiliyeti kazandırmaktadır. Ayrıca Sargı katmanı arttıkça betonların bütünlüğünü daha iyi koruduğu tespit edilmiştir.
5. Etriye adım mesafesi yeterli olmayan kolonların güçlendirilmesinde dışarıdan etriye sarmanın oldukça zahmetli bir işlem olduğu bilinmektedir. Günümüzde yaygın olarak karşılaşılan bu tür betonarme kolonların hibrit FRP kompozitler ile güçlendirilmesi avantaj sağlayacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Saatcioglu *et al.*, “The August 17, 1999, Kocaeli (Turkey) earthquake — damage to structures,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 28, no. 4, pp. 715–737, 2001.
- [2] H. Sezen, A. S. Whittaker, K. J. Elwood, and K. M. Mosalam, “Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey,” *Eng. Struct.*, vol. 25, pp. 103–114, 2003.
- [3] H. Sezen, A. S. Whittaker, K. J. Elwood, and K. M. Mosalam, “Performance of reinforced concrete buildings during the August 17, 1999 Kocaeli, Turkey earthquake, and seismic design and construction practise in Turkey,” *Eng. Struct.*, vol. 25, no. 1, pp. 103–114, 2003.
- [4] H. Kaplan, S. Yilmaz, H. Binici, E. Yazar, and N. Çetinkaya, “May 1, 2003 Turkey—Bingöl earthquake: damage in reinforced concrete structures,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 11, no. 3, pp. 279–291, 2004.
- [5] A. Dogangun, “Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey,” *Eng. Struct.*, vol. 26, pp. 841–856, 2004.
- [6] A. Doğangün, “Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey,” *Eng. Struct.*, vol. 26, no. 6, pp. 841–856, 2004.
- [7] A. Bayraktar *et al.*, “Structural Performance Evaluation of 90 RC Buildings Collapsed during the 2011 Van, Turkey, Earthquakes,” *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 29, no. 6, p. 4014177, 2013.
- [8] M. Tapan, M. Comert, C. Demir, Y. Sayan, K. Orakcal, and A. Ilki, “Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 34, pp. 606–628, 2013.
- [9] A. Bayraktar, A. C. Altunişik, and M. Pehlivan, “Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 53, pp. 49–72, 2013.
- [10] E. Çelebi *et al.*, “October 23, 2011 Turkey/Van-Ercis earthquake: Structural damages in the residential buildings,” *Nat. Hazards*, vol. 65, no. 3, pp. 2287–2310, 2013.
- [11] E. Damci, R. Temur, G. Bekdaş, and B. Sayin, “Damages and causes on the structures during the October 23, 2011 Van earthquake in Turkey,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 3, pp. 112–131, 2015.
- [12] R. Eid and P. Paultre, “Compressive behavior of FRP-confined reinforced concrete columns,” *Eng. Struct.*, vol. 132, pp. 518–530, 2017.
- [13] A. Mirmiran and M. Shahawy, “Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites,” *J. Struct. Eng.*, vol. 123, no. 5, pp. 583–590, 1997.
- [14] M. Shin and B. Andrawes, “Experimental investigation of actively confined concrete using shape memory alloys,” *Eng. Struct.*, vol. 32, no. 3, pp. 656–664, 2010.
- [15] Y.-Z. Zhong, Q. Yu, and Z. Tao, “Compressive behaviour of CFRP-confined rectangular concrete columns,” *Mag. Concr. Res.*, vol. 60, no. 10, pp. 735–745, 2008.

- [16] M. Seffo and M. Hamcho, "Strength of concrete cylinder confined by composite materials (CFRP)," in *Energy Procedia*, 2012, vol. 19, pp. 276–285.
- [17] T. Ozbakkaloglu and E. Akin, "Behavior of FRP-Confined Normal- and High-Strength Concrete under Cyclic Axial Compression," *J. Compos. Constr.*, vol. 16, no. 4, pp. 451–463, 2012.
- [18] A. Ilki, O. Peker, E. Karamuk, C. Demir, and N. Kumbasar, "FRP Retrofit of Low and Medium Strength Circular and Rectangular Reinforced Concrete Columns," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 20, no. 2, pp. 169–188, 2008.
- [19] J. Li and M. N. S. Hadi, "Behaviour of externally confined high-strength concrete columns under eccentric loading," *Compos. Struct.*, vol. 62, no. 2, pp. 145–153, 2003.
- [20] A. Ilki, N. Kumbasar, and V. Koç, "Low and medium strength concrete members confined by fiber reinforced polymer jackets," *ARI Bull. Istanbul Tech. Univ.*, vol. 53, no. 1, 2003.
- [21] H. Toutanji and Y. Deng, "Strength and durability performance of concrete axially loaded members confined with AFRP composite sheets," *Compos. Part B Engineering*, vol. 33, no. 4, pp. 255–261, 2002.
- [22] H. Saadatmanesh, M. R. Ehsani, and M. W. Li, "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps," *ACI Struct. J.*, vol. 91, no. 4, pp. 434–447, 1994.
- [23] A. Ilki, N. Kumbasar, and V. Koc, "Low strength concrete members externally confined with FRP sheets," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 18, no. 2, pp. 167–194, 2004.
- [24] H. A. Toutanji, "Stress-strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheets," *ACI Mater. J.*, vol. 96, no. 3, pp. 397–404, 1999.
- [25] L. Lam, J. G. Teng, C. H. Cheung, and Y. Xiao, "FRP-confined concrete under axial cyclic compression," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 10, pp. 949–958, 2006.
- [26] M. F. Green, L. A. Bisby, A. Z. Fam, and V. K. R. Kodur, "FRP confined concrete columns: Behaviour under extreme conditions," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, no. 10, pp. 928–937, 2006.
- [27] J. G. Teng and L. Lam, "Behavior and modeling of fiber reinforced polymer-confined concrete," *J. Struct. Eng.*, vol. 130, no. 11, pp. 1713–1723, 2004.
- [28] A. Sarıbiyik and N. Caglar, "Flexural strengthening of RC beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP," *Struct. Eng. Mech.*, vol. 58, no. 5, pp. 825–845, 2016.
- [29] F. Micelli and R. Modarelli, "Experimental and analytical study on properties affecting the behaviour of FRP-confined concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 45, no. 1, pp. 1420–1431, 2013.
- [30] H. K. Karan Veysel Çelik, "Karbon elyaf ile betonun güçlendirilmesi," vol. 30, no. 412, pp. 1–12, 2014.
- [31] T. Vincent and T. Ozbakkaloglu, "Influence of concrete strength and confinement method on axial compressive behavior of FRP confined high- and ultra high-strength concrete," *Compos. Part B Eng.*, vol. 50, pp. 413–428, 2013.
- [32] T. Turgay, Z. Polat, H. O. Koksall, B. Doran, and C. Karakoç, "Compressive behavior of large-scale square reinforced concrete columns confined with carbon fiber reinforced polymer jackets," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 357–364, 2010.
- [33] P. Yin, L. Huang, L. Yan, and D. Zhu, "Compressive behavior of concrete confined by CFRP and transverse spiral reinforcement. Part A: experimental study," *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 3, pp. 1001–1011, 2016.
- [34] Y. Xiao and H. Wu, "Compressive behavior of concrete confined by various types of FRP composite jackets," *J. Reinf. Plast. Compos.*, vol. 22, no. 13, pp. 1187–1201, 2003.
- [35] Y. Xiao and H. Wu, "Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets," *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 12, no. MAY, pp. 139–146, 2000.

- [36] Y.-L. Bai, J.-G. Dai, and J. G. Teng, "Cyclic Compressive Behavior of Concrete Confined with Large Rupture Strain FRP Composites," *J. Compos. Constr.*, vol. 18, no. 1, p. 4013025, 2014.
- [37] J. G. Teng and L. Lam, "Compressive Behavior of Carbon Fiber Reinforced Polymer-Confined Concrete in Elliptical Columns," *J. Struct. Eng.*, vol. 128, no. 12, pp. 1535–1543, 2002.
- [38] D. A. Bournas and T. C. Triantafillou, "Bond Strength of Lap-Spliced Bars in Concrete Confined with Composite Jackets," *J. Compos. Constr.*, vol. 15, no. 2, pp. 156–167, 2011.
- [39] K. A. Harries, J. R. Ricles, S. Pessiki, and R. Sause, "Seismic retrofit of lap splices in nonductile square columns using carbon fiber-reinforced jackets," *ACI Struct. J.*, vol. 103, no. 6, pp. 874–884, 2006.
- [40] D. a. Bournas, T. C. Triantafillou, K. Zygouris, and F. Stavropoulos, "Textile-Reinforced Mortar versus FRP Jacketing in Seismic Retrofitting of RC Columns with Continuous or Lap-Spliced Deformed Bars," *J. Compos. Constr.*, vol. 13, no. October, pp. 360–371, 2009.
- [41] K. K. Ghosh and S. A. Sheikh, "Seismic upgrade with carbon fiber-reinforced polymer of columns containing lap-spliced reinforcing bars," *ACI Struct. J.*, vol. 104, no. 2, pp. 227–236, 2007.
- [42] J. F. Berthet, E. Ferrier, and P. Hamelin, "Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets: Part B: Modeling," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 5, pp. 338–347, 2006.
- [43] T. Ozbakkaloglu and J. C. Lim, "Axial compressive behavior of FRP-confined concrete: Experimental test database and a new design-oriented model," *Compos. Part B Eng.*, vol. 55, pp. 607–634, 2013.
- [44] L. Lam and J. G. Teng, "Stress-strain model for FRP-confined concrete under cyclic axial compression," *Eng. Struct.*, vol. 31, no. 2, pp. 308–321, 2009.
- [45] T. C. Rousakis, A. I. Karabinis, and P. D. Kioussis, "FRP-confined concrete members: Axial compression experiments and plasticity modelling," *Eng. Struct.*, vol. 29, no. 7, pp. 1343–1353, 2007.
- [46] A. Ilki and N. Kumbasar, "Karbon Lif Takviyeli Polimer Kompozit Malzeme Ile Hasarlı Betonarme Elemanların Onarım ve G?????lendirilmesi," *Tek. Dergi/Technical J. Turkish Chamb. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 2597–2616, 2002.
- [47] A. Sarıbıyık, N. Çağlar, and M. Elmas, "Betonların Güçlendirilmesinde Karbon Fiber Takviyeli Polimer Yerine Cam Fiber Takviyeli Polimer Kullanılması," *Iist International Symp. Innov. Technol. Engineering Science*, pp. 745–754, 2013.
- [48] A. W. C. Oreta and J. M. C. Ongpeng, "Modeling the confined compressive strength of hybrid circular concrete columns using neural networks," *Comput. Concr.*, vol. 8, no. 5, pp. 597–616, 2011.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 25-04-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 15-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.308997	

D-200 Karayolu için Dönemsel ARIMA Yöntemi ile Kısa Dönemli Trafik Akım Tahmin Modellerinin Geliştirilmesi

Erdem Doğan*¹

ÖZ

Günümüzde trafik kontrol sistemlerinin verimli çalışabilmesi için kısa dönemli trafiğin tahmin edilmesi gerekli olmaktadır. Bu çalışmada, Kırıkkale İl sınırlarındaki (D-200, E88) karayoluna ait kısa dönemli trafik tahmin modellerinin geliştirilmesi için dönemsel otopregresif bileşik hareketli ortalama (SARIMA) tekniği kullanılmıştır. Modellemede kullanılan veri seti, yolun 29+100 km' sinde belirlenen kesiminde, yaklaşık 2 ay süre boyunca 15 dk.' lık zaman dilimleri şeklinde yapılan sayımlardan her bir şerit için ayrı olarak elde edilmiştir. Elde edilen trafik akımı verilerinin %80' i SARIMA modellerinin oluşturulması için, kalan kısmı ise modelin tahminlerinin test edilmesi için kullanılmıştır. Farklı tiplerdeki SARIMA modelleri iki şeritli karayolunun sağ ve sol şeritleri için oluşturulmuştur. Analizler sonucunda SARIMA(1,0,1)(0,1,1)672 her iki şerit için en düşük tahmin hatalarını üretmiştir. Modellere ait R2 değerleri ise sağ şerit için 0,92, sol şerit için 0,88 seviyelerinde olduğu hesaplanmıştır. Modellerin yüksek R2 değerleri ve düşük hatalar üretmesi nedeniyle geliştirilen SARIMA modellerinin Türkiye karayollarının kesintisiz akım koşullarını sağlayan yol kesiminde Türkiye'de kullanılabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Trafik tahmini, kısa dönemli, modelleme, ARIMA, SARIMA, Kırıkkale, D-200.

Developing Short-Term Traffic Forecasting Models Using Seasonal ARIMA Method for D-200 Highway

ABSTRACT

Nowadays, forecasting short-term traffic is necessary for traffic control systems to serve efficiently. In this study, short-term traffic forecasting models were developed using seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) technique for the highway (D-200, E88) in Kırıkkale border. The dataset for modeling were collected for each lane with 15 min periods from the road section which is in 29+100 km on the highway for two months. The 80% of data were utilized to develop SARIMA models and the rest of the data were used for testing the models. As a result of the analyses, SARIMA(1,0,1)(0,1,1)672 produced the lowest forecasting error values for both lanes. The R2 values of the models were calculated about 92% for right lane and 88% for left lane. The models generated high R2 values and low errors, therefore developed SARIMA models can be used on uninterrupted road sections in Turkish highways.

Keywords: Traffic forecasting, short-term, modelling, ARIMA, SARIMA, Kırıkkale, D-200

¹ Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale – edgan@kku.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karayollarında artan trafik hacminden dolayı, ulaşım altyapısının daha verimli hale getirilmesi yönündeki çalışmalara ihtiyaçlar duyulmaktadır. Elektronik sistemler, detektör ve diğer alanlardaki gelişmeler sonucunda sürücülerin karar vermesine, önceden uyarılmasına, yönlendirilmesine, daha verimli yolculuk imkânı sunmasına yönelik çalışmalar sonucunda Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) oluşmuştur. Mevcut ve gelecekteki olması tahmin edilen trafik koşullarının bilinmesi, karar verme işlemleri açısından çok önemli avantajlar ortaya koymaktadır. Bu nedenle kısa dönemli trafik akım tahmini AUS' ların geliştirilmesinde önemli rol oynamaktadır.

Bu çalışmanın amacı, D-200 karayolu 29+100 km' lik kesimine trafik akım değerlerini kullanarak dönemsel otoregresif bileşik hareketli ortalama (SARIMA) yöntemi ile kısa dönemli trafik tahminlerinin yapılmasıdır. Dünya' da bu konuda farklı bölgeler için çalışmalar olmasında karşın Türkiye yolları için kısa-dönemli trafik tahmini için yapılmış çalışmaya rastlanamamıştır. Trafik akımı değişiminin zaman ile ilişkili olmasından dolayı öncelikle zaman serisi yöntemleri ile incelenmiştir.

Kısa dönemli trafik tahmini konusunda ilk çalışmalarda klasik istatistik metotlarını trafiğin tahmininde kullanmışlardır [1]. Daha sonra ki yıllarda farklı algoritma yaklaşımları ile bu konu ile ilgili çalışmalar devam etmiştir. Trafik tahmininde yüksek çözünürlüklü ve zamana bağlı veriler ile çalışılmaktadır. Bu nedenle karmaşık tahmin modellerinin geliştirilmesi ve uygulanması için uygun bir ortam oluşturmaktadır. Lam ve diğerleri, yıllık ortalama günlük trafik değerini iki adet parametrik olmayan model yardımıyla tahmin etmişlerdir [2]. Araştırmacılar maksimum gauss olasılık ve parametrik olmayan regresyon modelleri sayım 87 istasyonundan gelen bilgiler yardımı ile oluşturulmuştur. Ardından yapılan karşılaştırmalarda, parametrik olmayan regresyon modelinin kullanılan diğer modelden istasyonların çoğunluğunda daha doğru sonuçlar ürettiği belirtilmiştir. Ayrıca parametrik olmayan regresyon modelinin ani ve beklenmeyen akım durumlarına daha iyi adapte olduğu diğer bir sonuç olarak sunulmuştur. Xie ve diğerleri kalman filtresi (KF) ve ayrık dalga tekniklerini bir arada kullanarak trafik akım tahminleri

gerçekleştirmişlerdir [3]. Yazarlar sadece KF ve ayrık dalga modeli ile gürültüsü azaltılmış veriler ile KF tahmin modeli karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak farklı dalga tipleri ile gürültü azaltılmasının, ham veriler kullanarak KF ile tahmin yapılmasından daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Guo ve diğerleri, trafik akım tahmini için veri toplama işleminde dönem sürelerinin etkilerini araştırmışlardır [4]. Araştırmacılar, 1~30 dk. arasında süreleri inceledikten sonra kullandıkları SARIMA + GARCH modeli için periyodu 5 dk. 'dan kısa olan verilerin uygun olmadığını, periyodların 10 dk. ve daha uzun olması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca kullanılan modeller için veri toplama periyodlarının değişkenlik gösterebileceğinin göz önünde tutulması gerektiğini vurgulamışlardır. Shekhar ve diğerleri, dönemlik otoregresif birleştirilmiş hareketli ortalama (SARIMA) modelini yeni dönem verileri ile adapte olabilecek şekilde tasarlamışlardır [5]. Ardından, bu modellerine ait 15 dk. 'lık trafik tahmin değerlerini, diğer modeller (KF, yenilemeli en az kareler ve en az ortalama kareler) ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, bütün modellerin yaklaşık sonuçlar ürettiği, KF' nin en az işlem yükü ile sonuçlara ulaştığı, geliştirilen SARIMA modelinin sahada AUS uygulamaları için kolaylıklar sağlayacağı fikri ortaya atılmıştır. Sheu ve diğerleri, akım, hız ve yoğunluk tahminleri yapmak amacıyla gerçek zamanlı tekrarlı öğrenme algoritması geliştirmişlerdir [6]. Ardından araştırmacılar, bu trafik tahmin algoritmasını, makalede açıklanan lineer ve lineer olmayan yöntemler ile karşılaştırmıştır. Trafik tahminini uzay-zaman otokorelasyonu kullanarak inceleyen araştırmacılar, Londra kenti içinde belirledikleri bir yol ağı için uzay- zaman modeli kurmaya çalışmışlardır [7]. Sonuç olarak, yol ağının tamamı için uygun uzay-zaman tahmini gerçekleştirebilecek genel modelin kurulamayacağını, bölgesel modellerin kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Tchakian ve diğerleri, spektral analiz ve hareketli ufuk adını verdikleri teknik ile 15 dk. trafik akım tahminlerinde bulunmuşlardır [8]. Araştırmacılar, düşük frekanslı modların tahminlere uygun olduğunu belirtmişlerdir. Chen ve diğerleri, tek bir detektörden elde edilen veriler yardımı ile trafik akım tahmini konusunda çalışmışlardır [9]. Diğer araştırmacılar tarafından denenilen tahmin modellerini, geliştirdikleri veri işleme işlemi ile karşılaştırmışlardır. Ayrıca, kayıp veri sorunu için olasılık prensipli birleşim analizi yönetiminin gün içindeki kayıp verilerin tahmini için

kullanmışlardır. Chang ve diğerleri, kısa-dönem trafik tahmini için geliştirilen modellerin, trafik akımında dalgalanma veya ani çıkış/iniş yaptığı durumlarda gelecek için tahminlerinin yetersiz olduğunu belirtmiştir [10]. Bu nedenle K-En yakın komşu metodu ile non-parametrik regresyon metodunun birleştirilmesine dayanan bir model geliştirmiştir. Buldukları sonuçlarda, metodun diğer metotlara göre durumlara daha iyi adapte olarak, ani durumlarda bile iyi sonuçlar ürettiğini belirtmişlerdir. Guo ve diğerleri, daha iyi kısa-dönem trafik tahmini için tekil spektrum analizi yöntemi ile veri düzelmesi/yumuşatması yapmıştır [11]. Düzeltelen bu veriler yeni geliştirilen gri sistem metodunda kullanılarak tahminler gerçekleştirilmiştir. SARIMA ile yeni model, Londra şehir merkezine ait bir koridor verileri için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yumuşatma yapıldığında daha iyi sonuçlar elde edildiği bildirilmiştir. Ayrıca bu konu ile yaptığı literatür araştırmasını diğer modeller ile yapılan tahminleri ve sonuçlarını geniş şekilde özetlemiş ve karşılatırmıştır [12].

Bu makalenin ilerleyen bölümlerinde, öncelikle elde edilen trafik akım verileri hakkında bilgi verilecek ardından geliştirilen SARIMA modelleri tanıtılacaktır. Geliştirilen modellerin test edilmesi sonucunda elde edilen değerler Bulgular başlığı altında toplanmış olup sonuçlar, analizler ve ileri çalışmalarda yapılması öneriler son bölüm altında toplanmıştır.

2. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

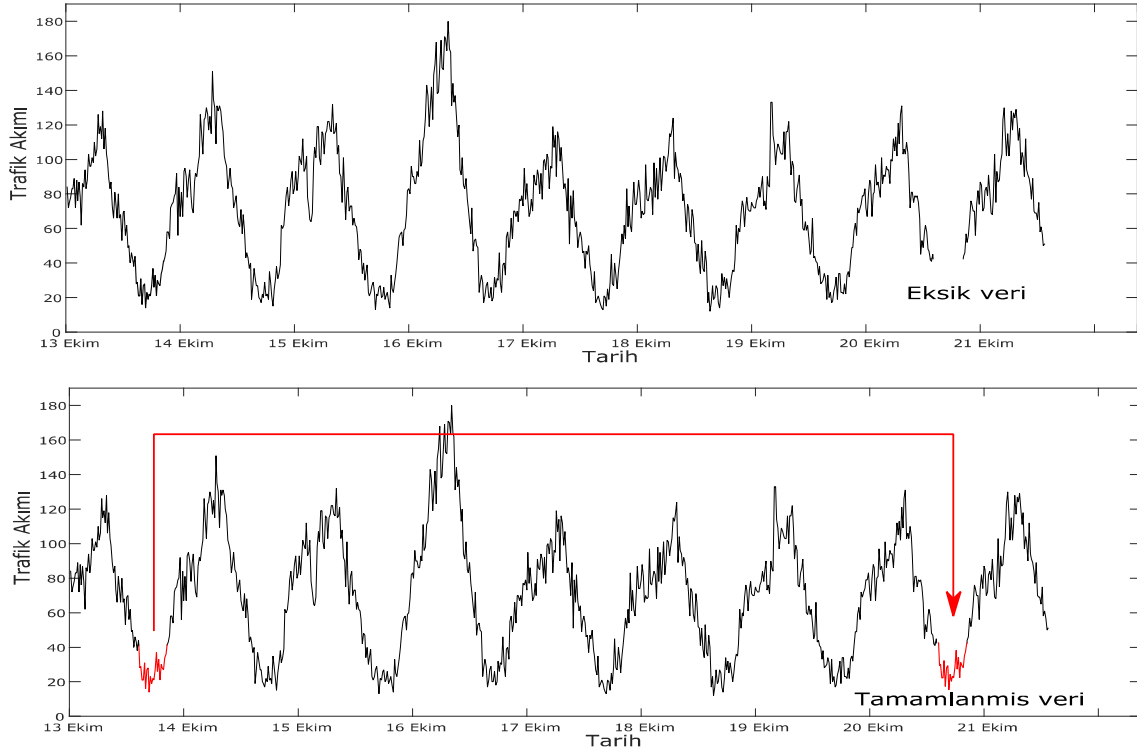
2.1. Trafik Akım Verileri

Trafik sayımının yapıldığı Kırıkkale ili sınırları içinde olan ve D-200 karayolunun Kırıkkale-Ankara istikametinde yer alan bölge Şekil 1' de verilmiştir. Çift platformlu olan D-200 karayolunun ölçüm yapılan kesiminde 20 km ileri ve geri yönlerinde ana yol trafiğini kesintiye uğratabilecek herhangi bir kesim (ör. sinyalizasyon kavşak, vs.) bulunmamaktadır. Bu nedenle sayım yapılan kesimde kesintisiz akım koşulları hâkim olmaktadır. Sayım işlemi sağ ve sol şeritler için ayrı olarak yerleştirilen NC-350 trafik sayım cihazları yapılmıştır. Detektörler karayolları ekipleri yardımıyla yol yüzeyine yerleştirilmiştir.

Sayım işlemi, 13 Ekim 2016 yılında başlatılmış ve kış şartlarının başlaması çalışmanın devam etmesini zorlaştırdığından 30.11.2016 tarihinde sayım işlemi bitirilmiştir. Sonuç olarak, toplam 4512 adet veri toplanmıştır. Sayım aletlerinin veri toplama ve batarya kapasitesi sınırlı olduğundan veri toplama işi üç ayrı sayım çalışması ile tamamlanmıştır. Bu aralıklarda yapılamayan sayımlardan ve diğer bilinmeyen nedenlerden veri sayımlarında kesintiler oluşmuştur. Eksik olan veriler aynı gün ve saat için bir önceki haftada olan veriler alınarak Şekil 2' de gösterildiği şekilde tamamlanmıştır. Bu şekilde toplam verinin % 1' inden daha az olan eksik veriler pratik şekilde tamamlanabilmiştir.



Şekil 1. Trafik sayımı çalışması yapılan bölge. (The location of traffic counting study.)



Şekil 2. Eksik verilerin tamamlanması. (Completion of missing data).

İncelenen tarihler arasında sağ ve sol şeritler için günlük ortalama 8627 araç geçmiştir. En yüksek taşıt miktarı sağ şerit için 720 araç/st olurken sol şerit için 684 araç/st olmuştur. Sağ şeridi kullanan araçların %63 hafif araçlar olurken, %27' lik kısmı ağır taşıtlardan oluşmaktadır. Sol şerit için ise %84' ü hafif araçlardan oluşmaktadır.

2.2. Zaman Serilerine ait Gösterimler ve ARIMA (Time Series Notations and ARIMA)

Otoregresif bütünleşmiş hareketli ortalamalar (ARIMA) yöntemi, zaman serilerinin analizinde ve gelecek değerlerin tahmin edilmesinde kullanılan bir yöntemdir. İlk temel özellikleri 1951 yılında Peter Whittle tarafından tanımlanmış olan yöntem daha sonra 1971 yılında George E. P. Box ve Gwilym Jenkins tarafından yayınlanan kitap [13] ile popüler hale gelmiştir.

ARIMA yönteminde, serilerinin herhangi bir zamandaki değeri, geçmiş döneme ait değerler ve tahminde yapılan hata terimlerinden oluşan doğrusal bir eşitlik ile belirtilmektedir. Modelde kullanılan serinin ortalamasının '0' olduğu ve varyansının seri boyunca sabit olduğu yani serinin durağan olduğu kabul edilmektedir. Durağan olmayan seriler için serinin geçmiş değerleri Eşitlik 1'de görülen şekilde farkları alınarak durağanlaştırılabilmektedir. Eşitlikte Δ ardışık

veriler arasındaki gecikme farkı olarak isimlendirilmektedir. Eşitlik 1a' da gecikme değeri "1" iken, gecikme değeri "2" için yapılacak olan fark işlemi Eşitlik 1b' de verilmiştir.

$$\Delta x_t = x_t - x_{t-1} \quad (1a)$$

$$\Delta^2 x_t = x_t - x_{t-1} - (x_{t-1} - x_{t-2}) \quad (1b)$$

Dönemsel tekrar gösteren serilerin durağanlaştırma işlemi, dönemsel fark işlemi ile yapılabilmektedir. Örneğin 24 saat aralıklar ile aynı tepkiyi veren bir seride dönemsel fark işlemi

$$\Delta_{24} x_t = x_t - x_{t-24} \text{ şeklinde tanımlanabilir.}$$

ARIMA modellerinde durağanlaştırma işleminin eşitlik olarak ifadesinin sadeleştirilebilmesi için gecikme operatörü (L) kullanılmaktadır. Gecikme operatörü Eşitlik 2' de verilen şekilde tanımlanmaktadır.

$$L^j x_t = x_{t-j} \quad (2)$$

Gecikme operatörü ile fark işlemleri:

1. dereceden fark: $(1-L)x_t = x_t - x_{t-1}$, 2.dereceden fark: $(1-L)^2 x_t = (1-2L+L^2)x_t = x_t - 2x_{t-1} + x_{t-2}$

şeklinde olur ve aynı yöntem ile yüksek dereceleri fark işlemleri benzer şekilde yazılabilir.

2.3. Dönemsel ARIMA modeli (Seasonal ARIMA Model)

ARIMA(p,d,q) modelleri, otoregresif (AR) ve hareketli ortalamalar (MA) olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır. AR(p) tahminlerin “p” dereceden gecikme değerlerine sahip veriler ile MA(q) ise geçmiş dönemlere ait “q” dereceden tahmin hatalarına bağlı olarak ARMA(p,q) Eşitlik 3’ deki şeklinde ifade edilebilmektedir. Gecikme fark işleminin derecesi ise “d” nin miktarı ile belirlenmekte ve Eşitlik 1a ve 1b’ de anlatılan fark işlemleri uygulanmaktadır.

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \dots + \phi_p x_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (3)$$

Dönemsel ARIMA gösterimi ise SARIMA(p,d,q)(P,D,Q)_s şeklindedir. Gecikme operatörü (L) ile genel gösterimi Eşitlik 4’ de verilmiştir.

$$\phi(L)\Phi(L^s)(1-L)^d(1-L^s)^D x_t = \theta(L)\Theta(L^s)\varepsilon_t \quad (4)$$

Burada:

$\phi(L)$: AR polinomu.

$\Phi(L^s)$: Dönemsel AR polinomu (SAR).

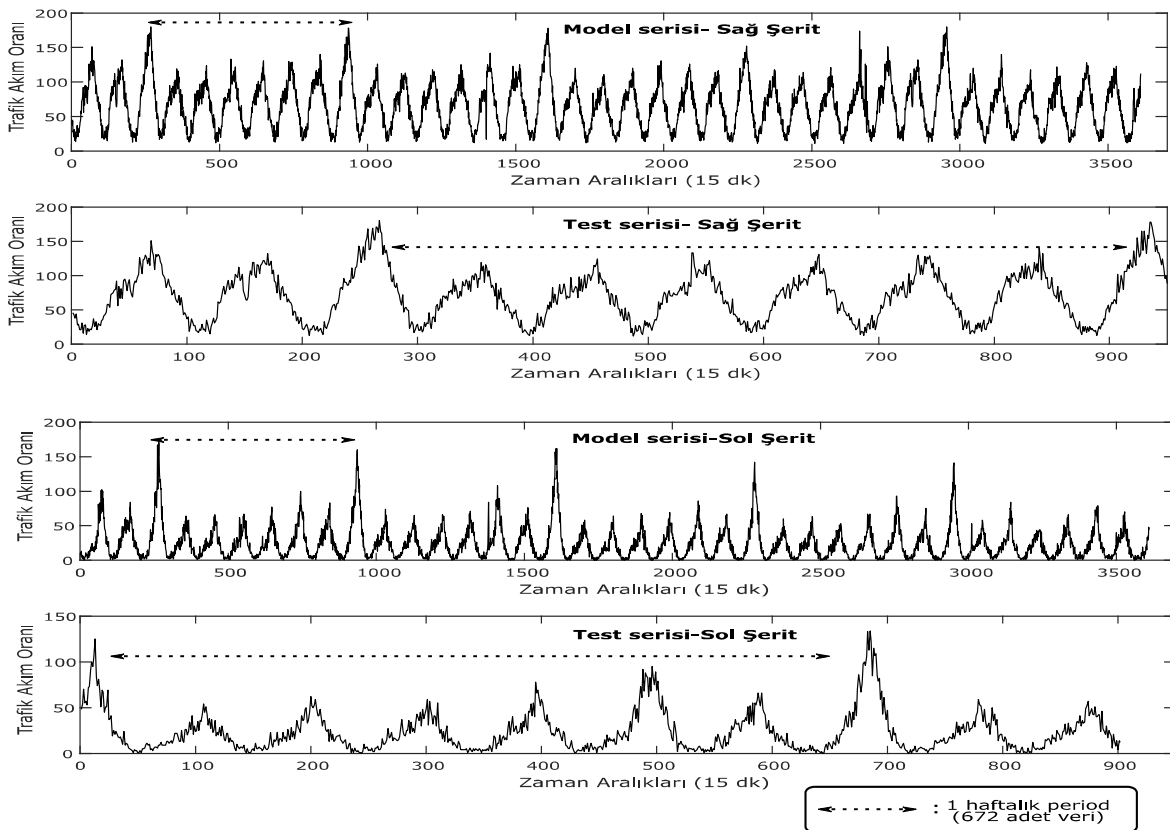
$\theta(L)$: MA polinomu.

$\Theta(L^s)$: Dönemsel MA polinomu (SMA).

$(1-L)^d, (1-L^s)^D$: Fark ve dönemsel fark işlemlerini göstermektedir.

2.4. SARIMA Trafik Akım Tahmin Modeli (SARIMA Traffic Flow Forecasting Model)

Trafik akım verileri Şekil 3 yardımı ile incelendiğinde, genellikle haftalık olarak kendini tekrarlayan örüntüler şeklinde olduğu görülmektedir. Bu nedenle trafik akımı için oluşturulacak olan ARIMA modellerinde dönemsellik söz konusu olmaktadır [5], [14]. SARIMA modelinin oluşturulması için D-200 karayolundan toplanan verilerin % 80’ i modelin oluşturulmasında kalan %20’ lik kısmı ise modelin test edilmesi için kullanılmıştır. Sağ ve sol şerit için Şekil 3’ de model ve test serileri görülmektedir.

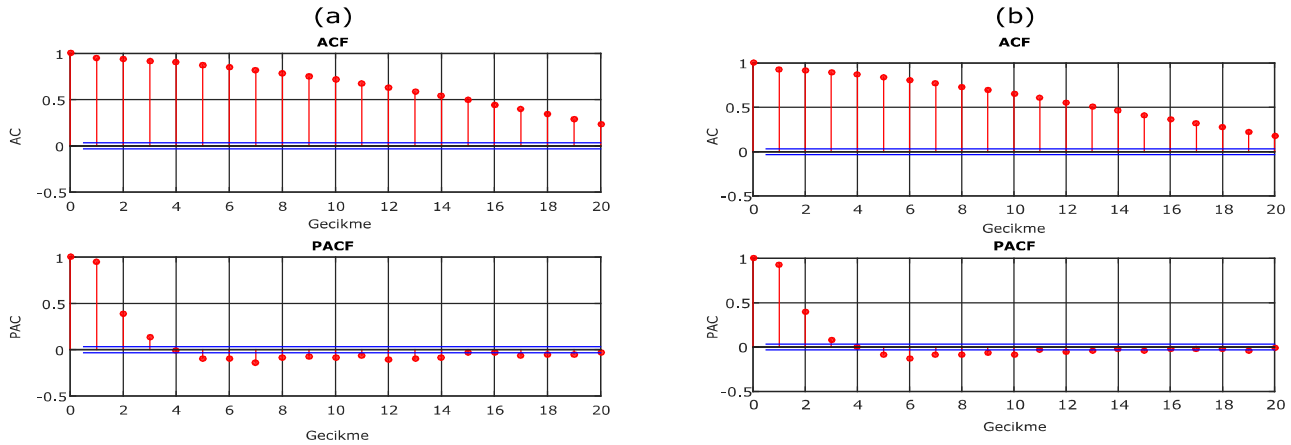


Şekil 3. Modelleme ve test için trafik akım oranları. (Traffic flow rates for modelling and testing)

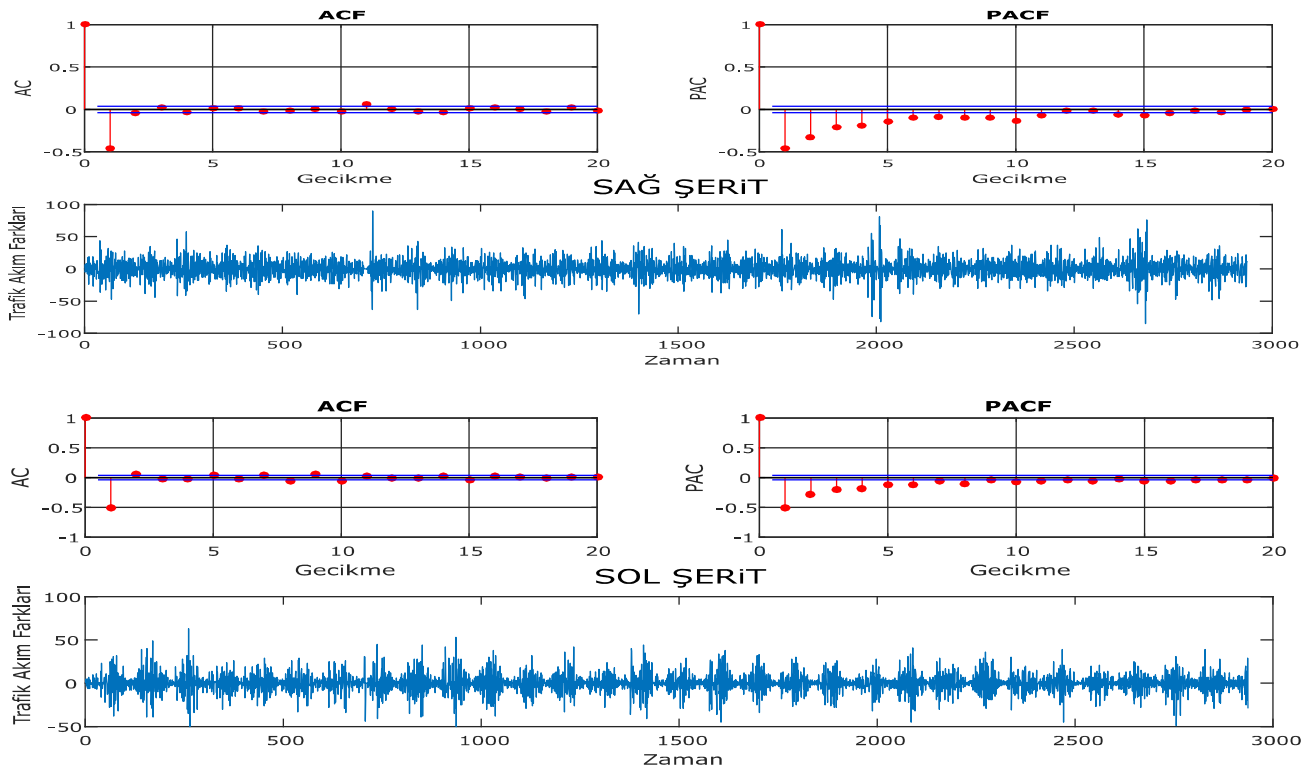
Zaman serilerinin durağanlığının belirlenmesinde otokorelasyon kullanılmaktadır. Otokorelasyon fonksiyonu (ACF), bir zaman serisinin farklı zamanlardaki değerleri arasındaki korelasyon fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Şekil 4' de sağ ve sol şeritler için ACF ve kısmi otokorelasyon fonksiyonu (PACF) verilmektedir. Bu fonksiyonlar, Box-Jenkins modellemesinde AR ve MA derecelerinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Her iki şerit için Şekil 4' de ki ACF değerlerinin yavaş olarak azalması serinin durağan olmadığını

göstermektedir. Bu nedenle seriler, fark işlemleri uygulanarak durağanlaştırılmıştır. Şekil 5' de ACF ve PACF değerlerinin her iki şerit için 1. gecikme değerinde kesildiği (cut-off) gözlenmektedir. Bu durum MA(1) durumunu göstermektedir. Ayrıca 672 gecikme değerinde serilerin negatif ACF değerleri olduğu bulunmuş olup bu durum SMA(672) durumunu işaret etmektedir. Oluşacak uygun zaman serisi modelinin SARIMA(0,1,1)(0,1,1)₆₇₂ şekilde oluşması beklenmektedir.



Şekil 4. (Sağ (a), sol (b)) Oto korelasyon (AC) ve kısmi oto korelasyon (PAC) değerleri. ((Right (a), left(b)) Auto and partial auto-correlation values)



Şekil 5. Durağanlaştırılmış trafik akım serisine ait ACF, PACF ve fark değerleri. (ACF, PACF and lags of traffic flows after stabilization)

3. BULGULAR (THE RESULTS)

Box-Jenkins metodunun işaret ettiği modele ek olarak farklı yapıda olan ARIMA ve SARIMA modelleri karşılaştırma yapabilmek için test edilmiştir. Bu model tipleri, Şekil 3’ de verilen 902 adet 15 dk.’lık trafik akım oranı sayımları yardımı ile test edilmiştir. Karşılaştırma için kullanılan model tipleri ve tahminlere ait ortalama karesel hatalar (T-OKH) Tablo 1’ de verilmiştir. T-OKH için kullanılan bağıntı Eşitlik 5’ de görülmektedir.

$$T - OKH = \frac{\sum (\bar{x}_t - x_t)^2}{N} \quad (4)$$

Dönemsellik değerlerinin bir gün öncesindeki değeri ile bağıntılı olması düşüncesi ışığında, dönemsel fark işlemi hem haftalık (672) hem de günlük (96) olarak aynı yapıdaki SARIMA modelleri için uygulanmış ve Tablo 1’ de hata değerleri her iki şerit için hesaplanmıştır. En düşük T-OKH değerleri olan 94,38 ve 64,66 değerleri

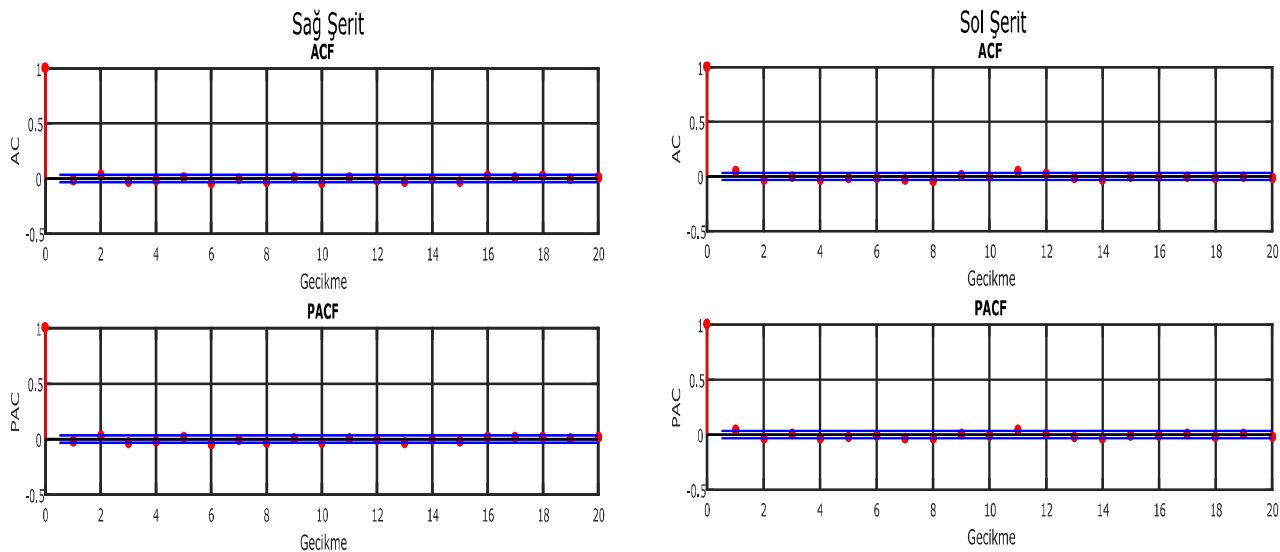
SARIMA (1,0,1) (0,1,1)₆₇₂ modelinde gözlenmiştir. Box-Jenkins metodu ile önerilen SARIMA Tablo 1’ de 7. sırada gösterilmiş olup 526,24 ve 236,1 hata değerleri üretmiştir. SARIMA (1,0,1) (0,1,1)₆₇₂ modeline ait ACF ve PACF değerleri Şekil 6’ dan incelendiğinde seri içinde korelasyon bulunmadığından dolayı kullanıma uygun olduğu ayrıca düşük T-OKH değerleri üretmesinden dolayı tahmin değerlerinin üretilmesi için bu modelin kullanılması gerektiği anlaşılmıştır. SARIMA (1,0,1) (0,1,1)₆₇₂ modeline ait $\phi, \theta, \Phi, \Theta$ parametrelerinin tespiti için en çok olabirlik metodu [15] kullanılmıştır. Her iki sağ ve sol şeritler için elde edilen SARIMA eşitlikleri sırasıyla Eşitlik 5a ve 5b’ de verilmiştir.

$$(1 - 0,961.L)(1 - L^{672})x_t = (1 + 0,832 .L)(1 + 0,672 .L^{672})\varepsilon_t \quad (5a)$$

$$(1 - 0,937.L)(1 - L^{672})x_t = (1 + 0,763.L)(1 + 0,512.L^{672})\varepsilon_t$$

Tablo 1. Modellerin test verisine ait ortalama karesel hata değerleri. (Mean squared errors of models for test data)

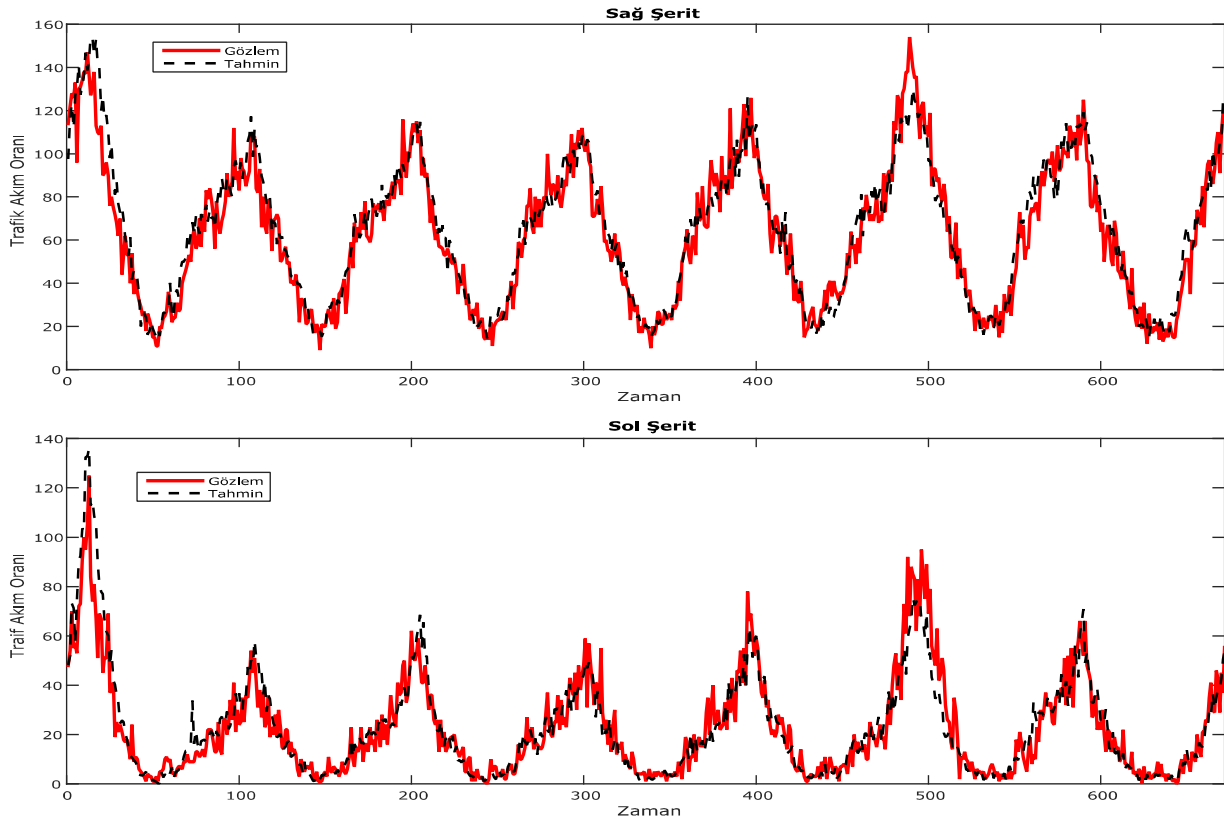
#	ARIMA	T-OKH Sağ	T-OKH Sol	#	SARIMA	T-OKH Sağ	T-OKH Sol
1	(0,1,1)	3243,2	955,5	6	(0,1,1) (0,1,1) ₉₆	234,92	337,5
2	(0,1,2)	3559,0	954,5	7	(0,1,1) (0,1,1) ₆₇₂	526,24	236,1
3	(1,1,0)	3243,2	955,5	8	(0,1,1) (1,0,1) ₉₆	3024,5	983,7
4	(1,1,1)	2971,5	918,7	9	(0,1,1) (1,0,1) ₆₇₂	233,51	119,7
5	(1,1,2)	2959,1	915,8	10	(1,0,1) (0,1,1) ₉₆	153,41	138,5
				11*	(1,0,1) (0,1,1) ₆₇₂	94,38	64,66
				12	(1,1,1) (1,1,1) ₉₆	236,78	314,1
				13	(1,1,1) (1,1,1) ₆₇₂	223,55	170,9



Şekil 6. Şeritler için SARIMA(1,0,1)(0,1,1)₆₇₂ modeline ait ACF ve PACF. (SARIMA(1,0,1)(0,1,1)₆₇₂ model ACF and PACF values for lanes.)

Şekil 7’ de ölçülen gözlem değerleri ile seçilen modellere ait tahmin değerleri karşılaştırılmıştır. Seçilen modelin gün içinde değişken olan trafik akım oranlarına ait trendleri yakaladığı Şekil 7’ den anlaşılmaktadır. Yine aynı şekilde sol şerit için en yüksek 125 araç/15 dk.’ lık akım oranı

değerini %8 hata yaparak 135 araç/15 dk. olarak tahmin etmiştir. Sağ şerit için ise yine aynı oranda fakat eksik tahmin etmiştir. Belirleme katsayıları ise sağ şerit için %92, sol şerit için %88 olarak tespit edilmiştir



Şekil 7. Şeritler için gerçek ve SARIMA(1,0,1)(0,1,1)₆₇₂ modeline ait tahmin değerleri. (SARIMA(1,0,1)(0,1,1)₆₇₂ model predictions and actual values for lanes.)

4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND CONCLUSION)

Bu çalışmada D-200 devlet yolundan elde edilen 15 dk.’ lık trafik akım oranları yardımı ile kısa dönemli trafik tahmin modelleri geliştirilmiştir. Ölçüm işleminin her iki şerit için ayrı olarak yapılmasından dolayı sağ ve sol şeritler için ayrı modeller geliştirilmiştir. Dönemsel ARIMA (SARIMA) tekniği ile tahmin modelleri oluşturulmuş olup haftalık gecikmeler ile oluşturulan SARIMA (1,0,1) (0,1,1)₆₇₂ modelinin her iki şerit için en düşük tahmin hata değerlerini yakaladığı anlaşılmıştır. Bu durum trafik akım değişimlerinin bir haftalık geçmiş değerleri ile benzerlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle kısa dönemli trafik tahmin modellerinde dönemselliğin dâhil edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

Yapılan analizler sonucunda her iki şerit için aynı tip SARIMA modelinin uygun olduğu tespit edilmiştir. Günlük gecikme ile haftalık gecikme değerleri (96 ve 672) ile oluşturulan modellerin karşılaştırılması sonucunda aynı tip modellerde haftalık gecikmeye sahip modellerin daha iyi sonuç verdiği, yani trafik değerlerinin bir önceki değerinden ziyade bir hafta önceki değerinin daha anlamlı olduğu görülmüştür. Modellerin test verileri performansları göz önüne alındığında trafik akım oranlarının kısa dönemli tahmin edilmesi için kullanılabilir oldukları anlaşılmıştır.

İlerleyen çalışmalarda farklı modelleme teknikleri ile yeni modeller geliştirilebilir ve bu çalışmada geliştirilen SARIMA modelleri ile karşılaştırmaları sağlanabilir. Böylece şeritler için aynı modellerin kullanılması yerine farklı modeller farklı şeritler için kullanılarak daha etkili modeller geliştirilebilir. Trafik sayımları hava

muhalefeti nedeniyle iki ay yapılabilmektedir. Sayım sürecinin tüm yıla yayılmasının ardından veri kümesinin büyüklüğünün model tahmin performansları üzerindeki etkisinin araştırılması yararlı olacaktır.

Günümüz gelişen ve karmaşıklaşan şehirlerinin ulaşım sistemlerinin etkili yönetilmesi kaçınılmaz bir sonuç olarak ortaya çıkmaktadır. Trafik yönetim sistemleri ise sadece doğru girdiler ile verimli çalışabileceği bilinmektedir. Bu nedenlerden dolayı ileriye yönelik tahminlerin etkinliğinin araştırılması gerekmektedir. Bu çalışma ile SARIMA yönteminin kesintisiz akım koşullarında D-200 karayolu için kullanılabilir tahmin değerleri ürettiği görülmüştür.



TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu makalede kullanılan trafik sayım verileri Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığına ait 2016-019 numaralı projeden elde edilmiştir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] M. S. Ahmed and A. R. Cook, "Analysis of freeway traffic time-series data by using box-jenkins techniques," *Transportation Research Record*, no. 722, pp. 1–9, 1979.
- [2] W. H. K. Lam, Y. F. Tang, and M. Tam, "Comparison of Two Non-Parametric Models for Daily Traffic Forecasting in Hong Kong," *J. Forecast.*, vol. 192, pp. 173–192, 2006.
- [3] Y. Xie, Y. Zhang, and Z. Ye, "Short-term traffic volume forecasting using Kalman filter with discrete wavelet decomposition," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 22, no. 5, pp. 326–334, 2007.
- [4] J. Guo, B. M. Williams, and B. L. Smith, "Data Collection Time Intervals for Stochastic Short-Term Traffic Flow Forecasting," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2024, no. 1, pp. 18–26, 2008.
- [5] S. Shekhar and B. M. Williams, "Adaptive Seasonal Time Series Models for Forecasting Short-Term Traffic Flow," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2024, no. 1, pp. 116–125, 2008.
- [6] J.-B. Sheu, L. W. Lan, and Y.-S. Huang, "Short-term prediction of traffic dynamics with real-time recurrent learning algorithms," *Transportmetrica*, vol. 5, no. 1, pp. 59–83, 2009.

- [7] T. Cheng, J. Haworth, and J. Wang, "Spatio-temporal autocorrelation of road network data," *J. Geogr. Syst.*, vol. 14, no. 4, pp. 389–413, 2012.
- [8] T. T. Tchraikian, B. Basu, and M. O'Mahony, "Real-time traffic flow forecasting using spectral analysis," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 13, no. 2, pp. 519–526, 2012.
- [9] C. Chen, Y. Wang, L. Li, J. Hu, and Z. Zhang, "The retrieval of intra-day trend and its influence on traffic prediction," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 22, pp. 103–118, 2012.
- [10] H. Chang, Y. Lee, B. Yoon, and S. Baek, "Dynamic near-term traffic flow prediction: system-oriented approach based on past experiences," *IET Intell. Transp. Syst.*, vol. 6, no. 3, p. 292, 2012.
- [11] F. Guo, R. Krishnan, and J. Polak, "A computationally efficient two-stage method for short-term traffic prediction on urban roads," *Transp. Plan. Technol.*, vol. 36, no. 1, pp. 62–75, 2013.
- [12] E. I. Vlahogianni, M. G. Karlaftis, and J. C. Golias, "Short-term traffic forecasting: Where we are and where we're going," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, Feb. 2014.
- [13] G. E. P. Box, G. M. Jenkins, G. C. Reinsel, and G. M. Ljung, *Time series analysis: forecasting and control*. John Wiley & Sons, 2015.
- [14] B. L. Smith, B. M. Williams, and R. Keith Oswald, "Comparison of parametric and nonparametric models for traffic flow forecasting," *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 303–321, 2002.
- [15] J. Pfanzagl, *Parametric statistical theory*. Walter de Gruyter, 1994.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 17-02-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 20-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.292668	

Altyapı kazılarının planlanmasında CBS tabanlı bir karar destek sistemi önerisi: Fatih ilçesi örneği

Halil İbrahim Yumrutaş^{*1}, Şükrüye İyınam²

ÖZ



Altyapı tesisleri özellikle kent merkezlerinde yolların ve kaldırımların altından geçirilmektedir. Yeni altyapı hatlarının yerleştirilmesi, mevcut hatların bakım/onarım ve iyileştirmeleri, zaman içerisinde doğabilecek nüfus artışlarına bağlı kapasite artışları, zorunlu deplasmanlar, vb. nedenlerden ötürü ortaya çıkacak kazı talepleri yol üstyapısı (rijit, esnek) ve yolu kullananlar (taşıt, yaya) açısından muhtelif problemler doğurmaktadır. Bu çalışmanın ilk safhasında, bahsi geçen sebeplerle ortaya çıkması muhtemel altyapı kazı çalışmalarında ilgili kurumlar arasında koordinasyon sağlanması, tekrarlı çalışmaların önlenmesi, muhtelif altyapı kazıları neticesinde ortaya çıkacak olan ekonomik kayıpların ve zamansal kayıpların önlenmesi ve yol üst yapısında kazılar sebebiyle oluşacak deformasyonların minimum seviyelere indirilmesi amacıyla ilgili altyapı kuruluşları tarafından kullanılması öngörülen “Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) Tabanlı Kentsel Altyapı Yönetim Sistemi (KENTSİS) Yazılımı” geliştirilmiştir. Çalışmanın ikinci safhasında ise KENTSİS yazılımına girilecek olan kazı taleplerinin gerçekleştirilme zamanlamasının belirlenmesinin kişisel insiyatiflere bırakılmaması, olası birtakım suistimallerin önlenmesi, hem sebep olacağı trafik artışı hem de yol ütyapısına vereceği tahribat gözetilerek optimum zaman ve sürede neticelendirilebilmesi amacıyla kent içi yol altyapı kazılarının önceliklendirilmesinde bulanık mantık karar destek sistemi önerilmiştir. Önerilen modelin KENTSİS yazılımına entegre olabilecek, zeki çizelgeleme yapabilecek ve pratikte uygulanabilir olması hedeflenmiştir. Söz konusu modelin uygulanması neticesinde bir yıl süre zarfında bulvar/caddelerde gerçekleştirilmiş olan 160 adet normal (planlı) kazı çalışması birleştirilerek 75 adet kazı çalışmasına düşürülmüş, sokaklarda gerçekleştirilmiş olan 130 adet normal (planlı) kazı çalışması birleştirilerek 41 adet kazı çalışmasına düşürülmüştür.

Anahtar Kelimeler: kentsel altyapı yönetim sistemi, altyapı kazısı, bulanık mantık modelleme, CBS

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük, iyumrutas@karabuk.edu.tr

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Ulaştırma Anabilim Dalı, İstanbul, iyinars@itu.edu.tr

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 17-02-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 20-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.292668	

A GIS based decision support system proposal for planning infrastructure excavations: Fatih district example

ABSTRACT

Urban infrastructure facilities are placed under roads or sidewalks and infrastructure excavation demands which ensue because of placing new infrastructure network, maintenance-repair-rehabilitation of existing infrastructure facilities, capacity increase, displacements, etc. cause various problems for pavements and road users (vehicles or pedestrians). In this study, a geographic information system (GIS) based urban infrastructure management system software (KENTSIS) has been developed, which must be used by all related infrastructure organizations in order to provide coordination of excavations, to prevent repeated excavations, to prevent time and economic loss due to traffic congestion during excavations, to minimize probable deformations in pavements and a GIS based decision support system for prioritizing urban road infrastructure excavations was proposed in order to prevent personel initiatives while determining time schedules for the work demands that were installed to the software, to prevent abuses, to designate the best excavation schedule considering both traffic and pavement. The proposed model was aimed to make “intelligent schedule” for prioritizing urban road infrastructure excavations integrated with infrastructure management system software. With the apply of the model for one year span, 160 excavations decreased to 75 in boulevard/mainstreets and 130 excavations decreased to 41 in narrow streets.

Keywords: urban infrastructure management system, infrastructure excavation, fuzzy logic modeling, GIS

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Altyapının kalitesi ve verimliliği; insanların yaşam kalitesini, sosyal sistemin sağlıklı yürümesini, ekonomik aktivitelerin devamlılığını doğrudan etkilemektedir. Bir milletin ekonomik gelişmişliğinin göstergesi onun altyapı gelişmişliği ile doğru orantılıdır [1]. Bir şehrin altyapısı, insan vücudunun dolaşım sistemine benzer. Bu sistemde en küçük bir problem dahi oluştuğunda, diğer organ ve sistemleri yani, genel sağlık ve yaşam koşullarını kötü yönde etkiler [2].

Altyapının birçok tanımı olmasına karşın genellikle “Kamu hizmetleri” ifadesiyle özdeşleştirilir. Kamu hizmetleri denilince; ilgili kurumlar (daha ziyade yerel yönetimler) tarafından tedarik edilen ve ihtiyaç duyulduğunda

geliştirilen elektrik, atık su, içme suyu, doğalgaz, haberleşme vb. tesisler akla gelmektedir [1]. Oldukça yüksek miktarda bir yatırım gerektiren kamu hizmetleri, halkın problemlerini çözmeyi amaçlayan çözümler üretir ve planlama, tasarım, imalat ve yönetim süreçleri, ilgili idare tarafından yürütülür veya denetlenir. Bu işler için gerekli malzeme imalat veya yönetim, ilgili idarenin denetiminde özel sektör eliyle de gerçekleştirilebilir [3].

Yol üstyapısı, yolun kullanıma açılmasıyla birlikte; yol yüzeyine etkiyen trafik yükleri, iklim etkileri, tasarım ve uygulama hataları, bakım/onarım eksikliği ve altyapı tesislerine müdahaleler sebebiyle birtakım bozulmalara maruz kalmakta ve henüz servis ömrünü tamamlamadan hatta servis ömrünün ilk yıllarında çeşitli müdahalelere (yama, tranşe veya yenileme)

maruz kalmaktadır. TS 10618 sayılı “Şehir İçi Yolları Teknik Alt Yapı Tesisleri Planlama ve Yerleştirme Kuralları” uyarınca kentsel altyapı tesisleri şehiriçi yolların ve kaldırımların altından geçirilmektedir [4]. Bu sebeple altyapıdaki bozulmalar doğrudan yol üst yapısını ve yolu kullananları etkilemekte olup tüm bu çalışmaların koordineli olarak yürütülmesi son derece önemlidir [5,6].

Son yıllarda çağın gereksinimi olan bilgi teknolojileri yerel yönetimler tarafından da hızla benimsenip kullanılmaktadır. Geleneksel kamu yönetimi enstrümanlarının yetersiz kalması, Coğrafi Bilgi Sistemleri benzer teknolojilerin kamu yönetiminde de etkin ve asli olarak kullanılmasını zorunlu kılmaktadır [7].

Altyapı hizmetlerinin gerçekleştirilmesinde, kaynakların verimli ve ekonomik kullanılması, etkili bir planlama ve koordinasyon gerektirmektedir. Özellikle büyükşehirlerde altyapı (içme suyu, kanalizasyon, doğalgaz, elektrik, haberleşme vb.) ve yol üst yapısının (asfalt, kaldırım vb) yapım, bakım/onarım ve iyileştirme çalışmalarının koordineli bir şekilde planlanması ve gerçekleştirilmesi; tekrarlı çalışmaların, zaman ve kaynak israfının, araç ve yaya trafiğinde aksamaların önlenmesi ile çevreye verilecek olan zararın minimum düzeye indirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır [8].

Uygulamada gözlemlenen problemlerin kaynağı aynı cadde veya sokak üzerinde ilgili kurumların birbirlerinden habersiz ve keyfi olarak farklı zamanlarda gerçekleştirdikleri tekrarlı bakım/onarım veya yenileme çalışmalarıdır. Buna bağlı olarak altyapıdaki bakım/onarım ve yenileme çalışmaları süresince;

- Yaya ve taşıt trafiğinin engellenmesi nedeniyle zaman kayıpları yaşanmaktadır,
- İş kazaları ve trafik kazaları nedeniyle can ve mal kayıpları yaşanmaktadır,
- Mevcut üstyapı zarar görmekte, servis ömrünü tamamlayamadan hatta servis ömrünün ilk yıllarında çeşitli müdahalelere (yama, tranşe veya yenileme) maruz kalmaktadır,
- Ses ve görüntü kirliliği sebebiyle civar sakinlerinin yaşam kalitesi düşmektedir,
- Üstyapıdaki bozulmalar nedeniyle tekrarlı çalışmalar yapılmakta, kaynak israfına yol açılmaktadır.

- Herhangi bir altyapı kurumu diğer bir kurumun altyapı tesisine zarar verebilmektedir.

Şekil 1’de İstanbul’da bir sokakta gerçekleştirilmiş olan koordinasyonsuz ve gelişmiş güzel bir altyapı çalışması nedeniyle yol üst yapısında meydana gelen deformasyon gösterilmiştir.



Şekil 1. Koordinasyonsuz bir kazı çalışması örneği [9]
(An example of incoordinated excavation)

Bu çalışmanın ortaya konulmasındaki en önemli sebep bahsi geçen problemlerin çözümüne katkı sağlamak amacıyla kent içi yollarda altyapı kazılarının Coğrafi Bilgi Sistemi tabanlı bir karar destek sistemi geliştirilerek önceliklendirilmesi ve koordine edilmesidir.

Uygulama alanının ve konusunun çok geniş olması, yüzlerce farklı veriyi içermesi, birçok farklı kuruma bağlı olması (İski, İğdaş, Tedaş, Telekom vb.), veriye ulaşma güçlükleri ya da ilgili kurumların veri paylaşımındaki isteksiz davranışları, bazı verilerin kayıt altına alınmamış olması, kayıt altına alınanların bir kısmının dijital olmayışı ya da farklı dijital formatlarda depolanmış olması, finansal yetersizlikler gibi nedenlerle, çalışma Fatih İlçesi ile sınırlı tutulmuştur.

Amerika, Kanada, Almanya ve Fransa gibi gelişmiş ülkeler başta olmak üzere birçok ülkede, altyapı ve üstyapı çalışmalarının çevreye en az zarar verecek şekilde, uygun maliyetlerle yerine getirilebilmesi ve etkin bir şekilde koordine edilebilmesi için çeşitli bilgisayar yazılımları ve karar destek sistemleri kullanılmaktadır [10,11]. Sarja [12], altyapının hizmet ömrü tahmini ve optimizasyonu üzerinde değerlendirmeler yaparak, altyapıdaki temel tanım ve kavramları irdelemiş, bakım-onarım-iyileştirme süreçlerine ilişkin bir takım yönetimsel öneriler sunmuştur.

Adeli [13], bilgisayar destekli altyapı mühendisliği çalışmalarını incelemiş ve yapay zeka, bulanık mantık, genetik algoritmalar, bilişsel modelleme, veri tabanı yönetimi, optimizasyon vb. üzerinde durmuştur.

Ülkemizde, 1984 yılından itibaren Büyükşehir Belediyelerine ilişkin yasal düzenlemelerle altyapı çalışmalarının koordinasyon içinde yürütülmesi sağlanmaya çalışılmış, günümüzde ise Büyükşehir Belediyelerinde Altyapı Koordinasyon Merkezleri (AYKOME) kurulması zorunluluğu getirilmiştir. Turabi [14] çalışmasında, kentsel yerleşim alanlarında altyapı ve üstyapı oluşumunun ekonomik analizini tartışacak bir model kurarak kent bilgi sistemlerinin gerekliliğinden bahsetmiştir. Ayrıca herbiri farklı kurumlar tarafından yönetilmekte olan altyapı tesislerinin ortak yaklaşımla yönetilmeleri gerektiğini savunmuştur. Boyacıoğlu [15], kurumlararası iletişim eksikliğinden dolayı altyapı tesislerinde ortaya çıkan sorunlardan bahsetmiş ve kapsamlı bir envanter çalışması ile veri tabanının gerekliliğini ortaya koymuştur. Sakız [16], Coğrafi Bilgi Sistemleri ile altyapı uygulamalarını analiz etmiştir. Sayıştay Başkanlığı raporunda [8], Büyükşehir Belediyelerinde altyapı faaliyetlerinin koordinasyonu incelenmiş, kurumlararası koordinasyonsuzluk ve mevcut problemler teşhis edilmiştir. Karataş [17], Türkiye’de kentsel teknik altyapı tesisleri uygulamalarında koordinasyonun önemi ile altyapı bilgi sisteminin gerekliliğini ortaya koymuş ve Altyapı Koordinasyon Merkezlerini irdelemiştir. Dinçylmaz [18], altyapı bilgi sistemlerinde coğrafi bilgi sistemlerini incelemiştir.

Çalışma kapsamında İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve ilgili diğer altyapı ve üstyapı kurumlarının üst düzey yöneticileri ile yüz yüze görüşmeler gerçekleştirilmiş, kurumların kentsel altyapı ve yol üstyapısı koordinasyonuna ilişkin sorunları ve ihtiyaçları tespit edilmiştir. Buna göre; Türkiye’de özellikle büyükşehir belediyelerinde, altyapı tesislerinin işletilmesinden sorumlu kurumların (kamu-özel sektör) bir kısmının altyapı bilgi sistemlerinin bulunmadığı bir kısmının ise kendi bünyelerinde kısmen de olsa altyapı bilgi sistemlerine sahip oldukları (iskabis, igabis vb.) ancak birbirleriyle entegre edilmiş bir karar destek sistemi ve veri tabanlarının (altyapı yönetim sistemi) olmadığı görülmüştür. Kazı başvuruları ya kağıt ortamında gerçekleştirilmekte ya da dijital ortamda gerçekleştirilmekte ancak her iki yöntemde de

sadece kazı talepleri alınıp onaylanmakta, herhangi bir koordinasyon sağlanamamaktadır.

2. KENTSEL ALTYAPI YÖNETİM SİSTEMİ YAZILIMI (URBAN INFRASTRUCTURE MANAGEMENT SYSTEM SOFTWARE)

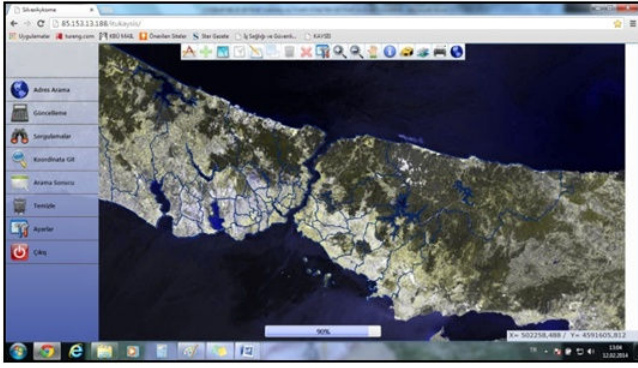
Uygulamada karşılaşılan sorunların, CBS tabanlı bütünleşik bir altyapı yönetim sistemi yazılımı (KENTSİS) ve bu yazılıma entegre olacak bir karar destek sistemi modeli geliştirilerek kentsel yol altyapısı kazılarının önceliklendirilmesi ve koordine edilmesi hedeflenmiştir. İlgili altyapı kurumlarınca kullanılması ve bu sayede bahsi geçen sorunların önlenmesi adına geliştirilen coğrafi bilgi sistemi tabanlı kentsel altyapı yönetim sistemi yazılımı web tabanlı olup sisteme giriş 85.153.13.188/kaysis_itu2/ web adresinden sağlanmaktadır. Kullanıcı adı: “B” ve şifre: “B” olarak atanmıştır. Sistemde kullanılan tüm altlık veriler İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Fatih Belediyesi Harita Müdürlükleri’nden temin edilmiştir. Giriş arayüzünde ilgili kurumların giriş yapabilmesi ve yeni şifre talebinde bulunabilmesi için gerekli kısımlar bulunmakta olup Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Sistem girişi (Login interface)

Yazılım, 7 adet modül olacak şekilde tasarlanmış olup modül erişimleri Şekil 3’de gösterildiği gibidir;

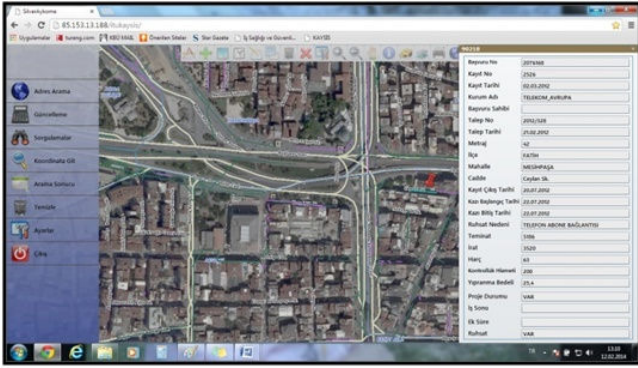
- Çizim ve başvuru modülü
- Harita modülü
- Sorgulama modülü
- Metraj modülü
- Acil müdahale modülü
- Onay modülü
- Analiz modülü



Şekil 3. Ana ekran (Main interface)

2.1. Çizim ve Başvuru Modülü (Drawing and Application Modul)

Çizim ve başvuru modülü kazı talebinde bulunacak kurumun başvurusu ile ilgili sözel ve buna bağlı coğrafi verileri oluşturabileceği bir modüldür. Şekil 4'de gösterilmiş olup aşağıdaki fonksiyonlara sahiptir.



Şekil 4. Çizim ve başvuru modülü (Drawing and application modul)

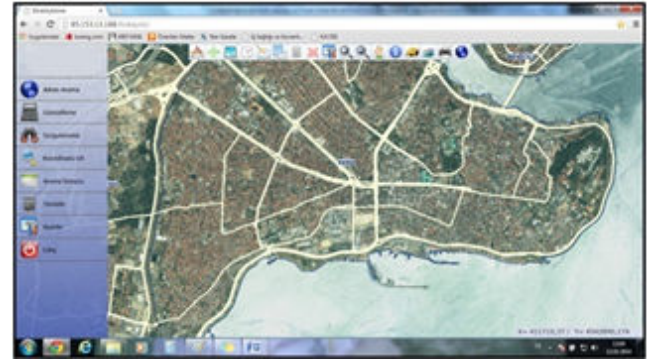
Yeni yapılması planlanan bir hatta ait bilgiler veya bakım-onarım çalışması öngörülen bir hatta ait bilgiler (ruhsat başvuru bilgileri) x, y, z koordinatları ile girilebilmektedir. Bunun için gerekli çizim araçları yer almaktadır. Ruhsat başvuru esansında çizim bilgilerinin yanı sıra aşağıdaki bilgiler de girilebilmektedir.

- Adres bilgisi (İlçe, Mahalle, Cadde, Sokak hatta sokağın/caddenin hangi kısmında çalışma yapılacağı örneğin 3. metre ile 15. metre arası ve hangi şeritlerde çalışma yapılacağı)
- Kurum bilgileri (İski, İğdaş, telekom vb. hangi kurumun çalışma yapacağı)
- Kazı ruhsatı alma sebebi (Arıza, kapasite artırımı, yeni hat, deplase vb.)
- Yapılacak çalışma (Asfalt kaplama, bordür yapma, kazı çukuru açma, baca yükseltme vb.)

- Çalışma zaman ve süresi (başlangıç ve bitim tarihlerini içerecek şekilde)
- Trafik aksatma durumu (gece-gündüz ve hangi saatlerde çalışılacağı)
- Metraj bilgileri (Yapılacak kazının uzunluk, genişlik ve derinliği)
- Proje bilgileri (proje sisteme sayısal olarak eklenebilmelidir. Bunun için kurumlar arası ortak bir veri formatı belirlenmelidir.)

2.2. Harita Modülü (Mapping Modul)

Şekil 5'de gösterilen harita modülü araçları kullanılarak aşağıdaki işlemler gerçekleştirilebilmektedir.

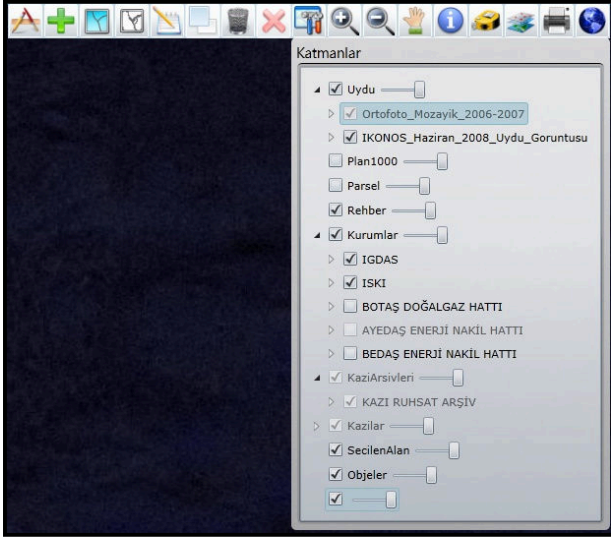


Şekil 5. Çizim ve katman butonları (Drawing and layer tools)

■ Katman ekleme ve çıkarma

Ana ekran üzerinde katmanlar linkine tıklanarak istenilen katmanlar eklenebilmekte veya çıkarılabilmektedir. Bu katmanlar aşağıdaki gibi olup Şekil 6'da gösterilmiştir.

- Halihazır harita
- Uydu görüntüsü
- İlçe, Mahalle, Cadde, Sokak, Kapı no (numarataj) bilgileri (güncelliği sağlanmalı)
- Mevcut ve yenilenen imar durum bilgileri (kapasite artışı vb. planlamalar için)
- Devam eden çalışmalara ait bilgiler
- Yeni yapımı planlanan hatlar
- Bakım-onarım çalışması yapılması planlanan hatlar
- Zemin haritaları (riskli zeminlerin önceden tahmini için)
- Fay hatları (riskli hatların önceden tahmini için)



Şekil 6. Katmanlar (Layers)

- Mevcut hatlar kırmızı, devam edenler sarı, ruhsat başvurusunda bulunmuş ancak değerlendirme aşamasında olan hatlar ise yeşil renktedir.
- İlgili altyapı tesisinin mevcut hatları görülebilmekte, üzerine tıklanıldığında birtakım bilgileri (koordinatları, hat uzunluğu, boru çapı, malzeme bilgisi, boru eğimi, güvenlik bandının olup olmadığı vb.) elde edilebilmektedir.
- Yol katmanına tıklanıldığında mevcut yol üstyapısının kot bilgileri alınabilmektedir.
- Mesafe ölçümü yapılabilmektedir.
- İstenilen yere ulaşabilmek için adres sorgulama (arama) yapılabilmektedir. Aramalar hem cadde, sokak, kapı no olarak hem de kurumlara ait fatura, sözleşme vb. ID numaraları ile yapılabilmektedir.
- “İnfo” butonu ile istenilen katman hakkında mevcut bilgiler alınabilmektedir.
- Yakınlaşma, uzaklaşma ve sürükleme butonları bulunmaktadır.

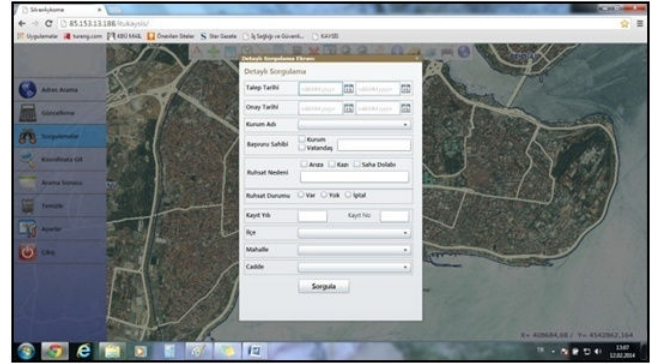
2.3. Sorgulama Modülü (Query Modul)

Sorgulama modülü veri tabanındaki ilgili bilgilerin çeşitli sorgulamalar ile ekrana çağrılarak gerekli incelemelerin yapılabilmesi, kurumların birbirlerinin mevcut ve planlanan hatlarını görebilmesi buna göre gerekli planlamalarını yapabilmesine olanak sağlamakta olup Şekil 7’de gösterilmiştir.

- Sorgulama modülünde başka hangi kurumların ilgili yerde çalışma yapmakta olduğu veya yapacağı, çalışmanın süreleri vb. görülüp

yapılacak yeni talep bu duruma göre gözden geçirilebilecek, gerekirse ileriye veya geriye ötelenebilecektir.

- Diğer kurumların mevcut hat bilgileri sistemden görülebilmeli yapılacak kazılarda arazi ekibine bu bilgiler önceden ulaştırılmalıdır. Bu suretle gerçekleştirilecek kazılar esnasında mevcut hatların zarar görmesi önlenmiş olacaktır.
- Detaylı sorgulama yapılabilmektedir;
 - Tarih aralığı seçilerek
 - Kurum adı seçilerek
 - Mahalle, Cadde, Sokak seçilerek
 - Ruhsat alışı nedeni seçilerek
 - Ruhsat durumu (var/yok/iptal) seçilerek
 - Koordinatlar girilerek
 - Ruhsat numarası girilerek



Şekil 7. Sorgulama modülü (Query modul)

2.4. Onay/Entegrasyon Modülü (Approval modul)

Bulanık mantık modelimiz ile entegre çalışarak onay verilmesinde kişisel inisiyatifleri devre dışı bırakmak amacıyla tasarlanan bir modüldür. Kurumlar kendi bünyelerinde yetkilendirdikleri kişi veya kişilerce e-imza ile başvuru gerçekleştirebilmekte ve yine aynı şekilde AYKOME tarafından yetkilendirilen kişi veya kişiler bu başvurulara e-imza ile onay verebilmektedir. Sistem, aynı cadde/sokak (yol grubu) için aynı yıl içerisinde ikinci bir defa kazı izni vermeyecek şekilde tasarlanmıştır.

2.5. Analiz/Planlama Modülü (Analysis Modul)

Veri tabanına kaydedilen tüm verilerin yorumlanarak analiz edilebilmesi ve karar mercilerine karar desteği sağlanabilmesi amacıyla birtakım raporlamaların yapılabileceği bir modüldür.

2.6. Metraj Modülü (Quantity Servey Modul)

Yapılacak çalışmaya ilişkin tahribat bedellerinin giriş ve hesaplamalarının yapılabileceği bir modüldür.

2.7. Acil Müdahale Modülü (Emergency Modul)

Arıza kazılarının gerçekleştirilmesi gerektiği hallerde bir nevi çağrı merkezi gibi hizmet verecek bir modüldür.

3. TEORİK ALTYAPI VE VERİ YÖNETİMİ (THEORETICAL INFRASTRUCTURE AND DATA MANAGEMENT)

Çalışmada kullanılan veriler İSKİ, İGDAŞ, İSFALT, TEDAŞ, BEDAŞ, TÜRKTELEKOM, İBB, Fatih Belediyesi vb. kurumlardan temin edilmiştir. Veri temini aşamasında ayrıca, İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve ilgili diğer altyapı ve üstyapı kurumlarının üst düzey yöneticileri ile yüz yüze görüşmeler gerçekleştirilmiş, kurumların kentsel altyapı ve yol üstyapısı koordinasyonuna ilişkin sorunları ve ihtiyaçları tespit edilmiştir. Bu tespitler KENTSİS yazılımının oluşturulmasında ve modelleme safhalarında yol gösterici olmuştur.

3.1. Modelleme (Modeling)

KENTSİS yazılıma girilecek olan kazı taleplerinin gerçekleştirilme zamanlamasının belirlenmesinin kişisel insiyatiflere bırakılmaması, olası birtakım suistimallerin önlenmesi hem sebep olacağı trafik artışı hem de yol üstyapısına vereceği tahribat gözetilerek optimum zaman ve sürede neticelendirilebilmesi amacıyla kentiçi yol altyapı kazılarının önceliklendirilmesinde bulanık mantık karar destek sistemi önerilmiştir.

Uygulama alanının ve konusunun çok geniş olması, yüzlerce farklı veriyi içermesi, veriye ulaşma güçlükleri ya da ilgili kurumlardan (İski, İgdaş, Tedaş, Telekom vb.) veri temininde yaşanan sorunlar, elde edilen verilerin dijital olmayışı ya da farklı formatlarda depolanmış olması, finansal yetersizlikler ve zaman sınırlaması gibi nedenlerle, çalışmalar neticesinde önerilmiş olan model sadece İstanbul Büyükşehir Belediyesi Fatih İlçesi sınırlarında uygulanmıştır. Özellikle belirsizlikler içeren, doğrusal olmayan ve eksik verilerin bulunduğu problemlerin kolayca modellenebilmesi ve kontrol, karar verme, tahmin problemleri başta olmak üzere pek çok alanda yaygın bir şekilde kullanılması sebebiyle, yol

üstyapısı kazılarının önceliklendirilmesinde karar verme amaçlı geliştirilen modelimize uygunluğu bakımından Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Yöntemi tercih edilmiştir [19].

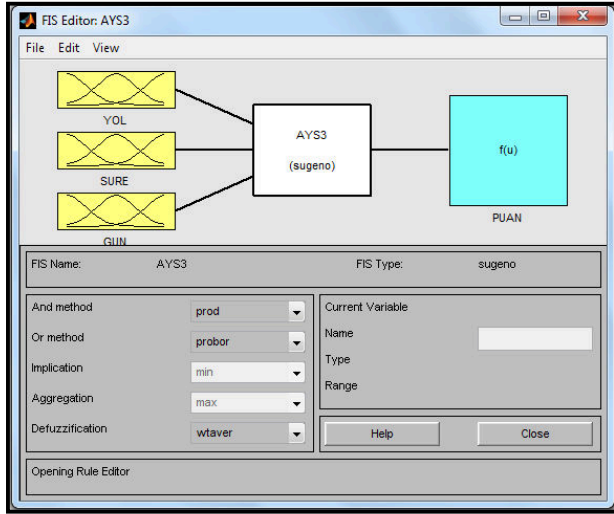
Bulanık mantık modellemelerinde kullanılan başlıca yöntemler Mamdani ve Takagi-Sugeno yöntemleridir. Sugeno yöntemi, temel olarak Mamdani modeli ile aynıdır. Aralarındaki fark çıktı kümesinin sabit ya da doğrusal olmasıdır [20]. Sugeno yöntemi Mamdani yöntemine kıyasla daha kompakt ve sayısal olarak daha randımanlıdır. Sugeno sistemi bulanık modelin oluşturulmasında daha uyumlu teknikler içerir. Bu teknikler bulanık sistemin veri setlerini kullanarak en iyi modeli oluşturmasında üyelik fonksiyonlarını duruma uyarlayabilirler. Ayrıca matematiksel analizler için daha uygundur [21]. Bu çalışmada, bulanık mantık ile verilerin değerlendirilmesinde, MathWorks firmasının Matlab yazılımı kullanılmış olup, çıktı verilerinin sabit sayılar olması sebebi ile Sugeno modeli tercih edilmiştir. Matlab yazılımı, sayısal hesaplama, veri analizi ve görüntülenmesi, interaktif algoritma geliştirilebilmesi amacıyla yönelik bir bilgisayar yazılımıdır. Matlab, kullanıcıya, içerisinde birçok önceden tanımlı fonksiyon kütüphanesini barındıran araçlar sunmaktadır. Bu çalışmada, bu araçlardan “Fuzzy Logic Toolbox” içerisinde kayıtlı fonksiyonlardan ve “Simulink” simülasyon modeli oluşturma fonksiyonundan yararlanılmıştır. Araç kutusu (toolbox), geliştirilen yazılım arayüzleri tarafından da kullanılabilen komut dosyaları, grafik arayüze sahip gereçler de barındırmaktadır. Bu sayede bulanık çıkarım sistemleri geliştirilebilmekte ve diğer yazılım arayüzler ile iletişim kurabilmektedir. Matlab Fıs editörden aynı zamanda değişkenlerin değerleri ile çıkış değişkenin aldığı değerleri görmek mümkündür. Kullanıcı hangi kuralın uygulandığını buradan takip edebilir. Kullanıcı bulanık mantık sınıflandırıcısının giriş ve çıkış değişkenlerinin sayısını, üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerini, üyelik fonksiyonlarının tiplerini ve sayılarını, kural tabanının kural sayısını ve kurallarını değiştirebilir. Yeni kural ekleyebilir ve mevcut kuralları değiştirebilir [22]. Bu özellikler, bulanık mantık modeline esneklik kazandırmakta, ileride değişecek şartlara göre güncellemelerin yapılmasına ve daha net sonuçların elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

3.2. Matlab “Fuzzy Logic Toolbox” Kullanılarak Bulanık Öncelik Modeli Oluşturulması (Matlab “Fuzzy Logic Toolbox” to Develop Fuzzy Priority Model)

Modelimizde, öncelik belirlenmesinde üç bulanık değişkenin etkisi vardır. Bunlar;

- Çalışma yapılan yer (YOL)
- Çalışma yapılan süre aralığı (SÜRE)
- Çalışma yapılan günler (GÜN)

olup Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Bulanık değişkenler (Fuzzy variables)

Çalışma yapılacak yerin önemi; yol tipi, yol türü, kaplama cinsi ve pratik şerit sayılarına bağlı olarak değişmektedir. “Yol tipi” ve “Yol türü” özellikle taşıt ve yaya trafik hacmi açısından, “Pratik şerit sayıları” yolun kapasitesi açısından, “Kaplama cinsi” ise kazının ortaya çıkaracağı maliyet açısından önem arz etmekte olup amaç; trafik hacminin yüksek olduğu ve kaplama cinsinin yüksek kalitede olduğu yollarda kurumları daha planlı çalışmalar yapmaya sevk etmek, bu suretle yaya ve taşıt trafiğinin yıl içerisinde tek seferde engellenmesini sağlamak ve kaplamaya verilecek olan zararı asgariye indirerek yol üstyapısının hizmet ömrünü yükseltmektir.

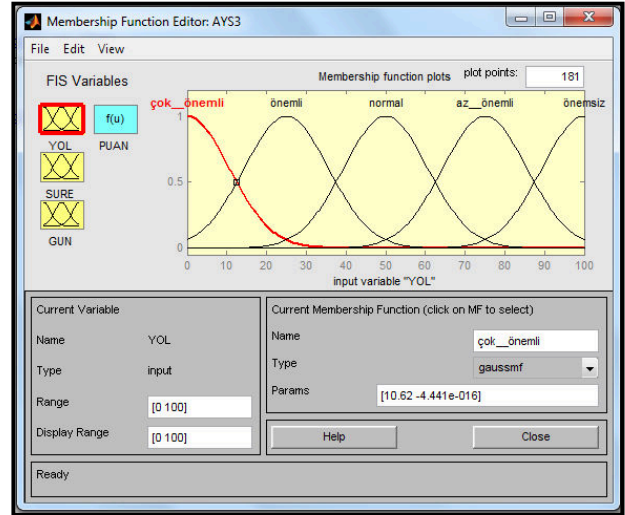
Çalışma yapılacak süre aralığı, özellikle yaya ve taşıt trafiği açısından önem arz etmekte olup amaç; kurumları kısa süreli çalışmalar yapmaya sevk etmek, bu suretle yaya ve taşıt trafiğinin yıl içerisinde daha kısa sürelerde engellenmesini sağlamak ve kazı çalışmaları sebebiyle çevreye gayri ihtiyari olarak verilecek rahatsızlığı en kısa süreye indirmektir.

Çalışma yapılan gün veya günler özellikle trafik yoğunluğu açısından önem arz etmekte olup amaç trafik yoğunluğunun diğerlerine nazaran daha az

olduğu gün ve aylarda çalışma yapılmasını sağlamaktır.

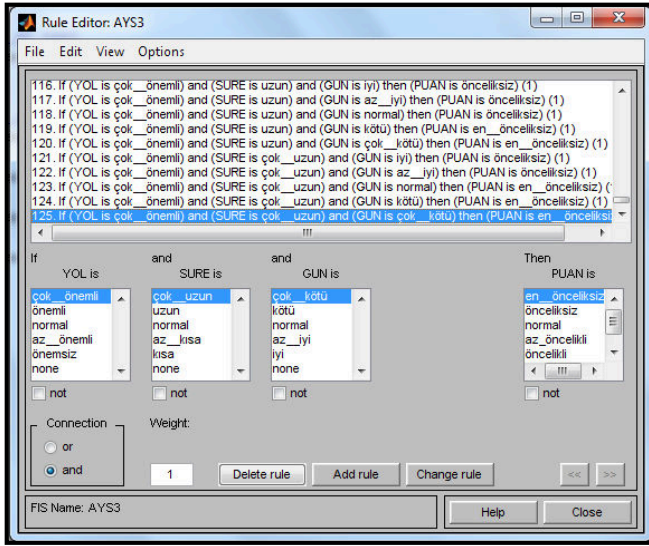
Konuyla ilgili literatür incelendiğinde üyelik fonksiyonlarının kullanımlarında, fonksiyonların şekillerinin hassas olmasının çok da önemli olmadığı pek çok örnekte görülmüştür. Şeklin çok hassas olmasından ziyade önemli olan; dilsel tanım aralıklarının iyi tespit edilmesi, bulanık küme sayısı ve kümeler arası geçişlerin olmasıdır [23]. Geliştirilen bulanık modelin üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasında, dilsel tanım aralıklarını en iyi temsil etmesi sebebiyle Gaussian tipi seçilmiştir.

“Yol” bulanık değişkenine ait gaussian tipi üyelik fonksiyonları (çok önemli, önemli, normal, az önemli, önemsiz), “Süre” bulanık değişkenine ait gaussian tipi üyelik fonksiyonları (çok uzun, uzun, normal, az kısa, kısa), “Gün” bulanık değişkenine ait gaussian tipi üyelik fonksiyonları (çok kötü, kötü normal, az iyi, iyi) olmak üzere Şekil 9’da bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 9. Üyelik fonksiyonları (membership functions)

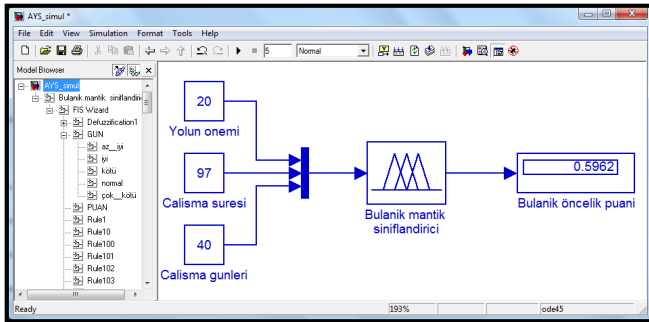
3’er adet bulanık değişken ve her birine ait 5’er adet üyelik fonksiyonları kullanılarak 125 adet kural tabanı oluşturulmuş olup kural tabanı editörü Şekil 10’da gösterilmiştir.



Şekil 10. Kural tabanı editörü (Rule editor)

3.3. Matlab “Simulink Toolbox” Kullanılarak Bulanık Modelin Durulaştırılması (Defuzzification of Fuzzy Model Using Matlab “Simulink Toolbox”)

Bulanık mantık değişkenlerine ait değerlerin durulaştırılması amacıyla oluşturulan Simulink modeli yapısı Şekil 11’de gösterilmiştir. Buna göre “yolun önemi”, çalışma süresi” ve “çalışma günleri” girdileri “bulanık mantık sınıflandırıcı”dan geçerek ilgili kazı çalışmasına ait “bulanık öncelik puanını” oluşturmaktadır. Sonuç yüzdesel değer olarak elde edilmekte olup excell tablolarında 1-100 arası puan şeklinde ifade edilmiştir.



Şekil 11. Simulink model yapısı (Simulink model)

3.4. Bulanık Öncelik Puanlı Çizelgeleme (Fuzzy Priority Score Schedule)

Çizelgenin oluşturulmasında ilgili kurumlardan temin edilen 2012 yılı kazı ruhsatı başvuruları dikkate alınmıştır. Excell ortamında oluşturulan tabloda İstanbul İli, Fatih İlçesi’nde 2012 yılı içerisinde gerçekleştirilmiş olan kazılara ait Mahalle, Cadde, Sokak, Kurum adı, Kazı uzunluğu, talep tarihi, kazı başlangıç ve bitiş tarihleri bilgileri yer almaktadır.

Buna göre; 290 adet normal (planlı) kazıya ait veriler ve 468 adet arıza (plansız) kazıya ait veriler Ek A’ da sunulmuştur.

Başvuruların doğru ve verimli bir şekilde değerlendirilebilmesi için “öncelik” kavramının doğru bir şekilde tanımlanması ve kullanılması gerekmektedir. Bunun için de başvurulardan hangilerinin geciktirilebileceği veya öne alınabileceği gerçekçi seçim kriterleri ile açık olarak belirlenmelidir [24]. Herhangi bir kazı başvurusuna ait her bir bulanık değişken (Yol, Süre, Gün) öncelikle kendi içerisinde 1-100 arası puanlamaya tabi tutulmuştur. Daha sonra “yolun önemi”, “çalışma süresi” ve “çalışma günleri” girdileri bulanık mantık sınıflandırıcıdan geçerek ilgili kazı çalışmasına ait “bulanık öncelik puanını” oluşturmakta olup aynı yol grubu için herhangi bir kazı başvurusunun değerlendirilmesi aşamasında en yüksek puana sahip başvuru “öncelikli” olarak tanımlanmış ve diğer başvurular en yüksek puana sahip başvuru ile birleştirilme yoluna gidilmiştir.

3.4.1. Yol (Road)

Kazı başvurusunda bulunmuş olan Bulvar/Cadde ve Sokaklar 1-100 arası puanlanmıştır. Puanlama için Fatih İlçesi Mahalle, Yol ismi, Yol tipi, Yol türü, Teorik şerit sayıları, Pratik şerit sayıları, Kaplama cinsi, Yol genişliği, Yol uzunluğu bilgileri kullanılmıştır. Puanlamaya esas kriterler; Yol tipi, Yol türü, Kaplama cinsi ve Pratik Şerit sayıları olup her bir kriter kendi içerisinde önemi yüksek olanın puanı düşük olacak şekilde puanlanmıştır.

“Yol tipi” ve “Yol türü” özellikle taşıt ve yaya trafik hacmi açısından, “Pratik şerit sayıları” yolun kapasitesi açısından, “Kaplama cinsi” ise kazının ortaya çıkaracağı maliyet açısından önem arz etmekte olup amaç; trafik hacminin yüksek olduğu ve kaplama cinsinin yüksek kalitede olduğu yollarda yapılması planlanan kazılara düşük puan vererek bir nevi ceza puanı uygulamak ve bu suretle özellikle anaarterlerde kurumları daha planlı çalışmalar yapmaya sevk etmektir. İlgili puanlar literatürde bu yönde bir çalışma olmaması sebebiyle subjektif olarak atanmıştır. Söz konusu puanlama Tablo 1’de sunulmuştur. Daha sonra aritmetik ortalamaları esas alınarak 1-100 arası bir puan elde edilmiş olup Ek A’da sunulmuştur.

Tablo 1. Yol puanlama kriterleri (Road scoring criteria)

Yol Puanlama Kriterleri			
Yol Türü	puan	Pratik Şerit Sayıları	puan
Bağlantı yolu	10	1	100
Bulvar	10	2	75
Cadde	10	3	50
Çıkamaz	100	4	25
İç yol	75	Kaplama Cinsi Puan	
Kavşak	10	Asfalt	10
Merdivenli yol	100	Beton	10
Meydan	10	Parke	25
Park yolu	100	Stabilize	50
Site yolu	100	Toprak	100
Sokak	50	Yol Tipi Puan	
Tali yol	75	Ana arter	10
Trafiğe kapalı yol	100	İlçe	50
Yaya yolu	100	Trafiğe kapalı yol	100

3.4.2. Süre (Duration)

Kazı başvuruları, çalışma sürelerine bağlı olarak 1-100 arası puanlanmıştır. Puanlama için Fatih İlçesi 2012 yılı kazı çalışmalarının başlangıç ve bitiş tarihleri esas alınmıştır. Kazı başvuruları “saat” olarak değil “gün” olarak gerçekleştirilmiş ancak tek günlük çalışmaların kazı uzunluğuna bağlı olarak bir kaç saat içerisinde tamamlanabilmesi göz önünde bulundurularak tüm çalışma süreleri saate çevrilmiştir. Bunun için “Kazı uzunluğu”, Altyapı Koordinasyon Müdürlüğü’nün her kurum için belirlemiş olduğu “Kazı süreleri”ne bölünmüş olup bu süreler Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Kazılar için izin verilen çalışma süreleri (allowed excavation durations)

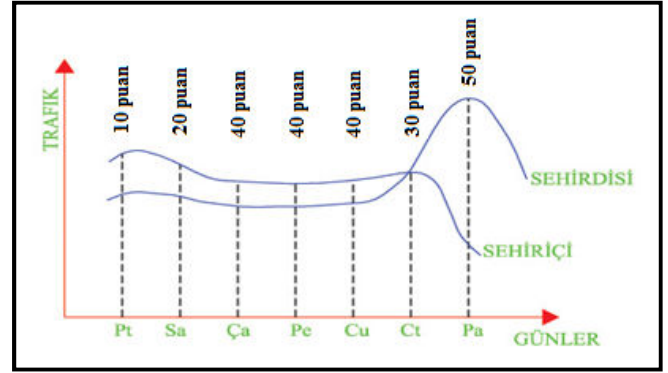
Kurum Adı	İzin Verilen Çalışma Süreleri
İski Kanalizasyon	5m/gün
İski İçme Suyu	20m/gün
İğdaş Çelik Boru	40 m/gün
İğdaş Polietilen Boru	75 m/gün
Bedaş	20 m/gün
Telekom	10 m/gün

Microsoft Excell ortamında çalışma süresi uzun olan yolun puanı düşük olacak şekilde formül oluşturularak 1-100 arası puanlama yapılmıştır. Süre, özellikle yaya ve taşıt trafiğinin engellenme zamanının uzunluğu açısından önem arz etmekte olup amaç; uzun süreli planlanan kazılara düşük puan vererek bir nevi ceza puanı uygulamak ve bu suretle kurumları daha kısa süreli çalışmalar yapmaya sevk etmektir. Puanlama için en fazla

çalışma günü 30 gün esas alınarak 720 saat değeri 1 puan olacak şekilde formülize edilmiş olup sonuçlar Ek A’da sunulmuştur.

3.4.3. Gün (Day)

Kazı başvuruları, çalışma günlerine bağlı olarak 1-100 arası puanlanmıştır. Puanlama için Fatih İlçesi 2012 yılı kazı çalışmalarının başlangıç ve bitiş tarihleri esas alınmıştır. Ayrıca şehiriçi ve şehirdışı trafik yoğunluğunun haftalık değişimini gösteren Şekil 12’den faydalanılmıştır.



Şekil 12. Haftalık trafik değişimi [25] (Change of the traffic volume depending on the days of week)

Buna göre Pazartesi günleri şehir içi trafiğin en yüksek seviyede olduğu, Salı günleri düşüş eğilimine geçtiği, düşüşün Çarşamba gününe kadar devam ettiği, Çarşamba, Perşembe ve Cuma günleri hemen hemen sabit kaldığı, Cumartesi günü bir miktar yükselişe geçse de Pazar günleri en düşük seviyede olduğu gözlenmektedir. Puanlamada trafik yoğunluğunun yüksek olduğu çalışma günleri için daha düşük puan verilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirileceği gün veya günler, özellikle trafik yoğunluğu açısından önem arz etmekte olup amaç; trafik yoğunluğunun yüksek olma ihtimali bulunan zamanlarda yapılması planlanan kazılara düşük puan vererek bir nevi ceza puanı uygulamak ve bu suretle kurumları nisbeten daha uygun günlerde çalışmalar yapmaya sevk etmektir. İlgili puanlar literatürde bu yönde bir çalışma olmaması sebebiyle subjektif olarak atanmış olup Şekil 12’de gösterilmiştir.

Ay, süre olarak astronomik bir zaman periyodu olduğu halde trafik açısından önemli değildir. Zira, insanlar çalışmalarını hafta esasına göre ayarlamaktadırlar. Ancak genel itibarıyla ayın ilk haftası ve özellikle tatil sezonlarına rastlayan hafta ve günler değişim gözlenmektedir [25]. Yıl içinde trafik yoğunluğunun değişimi gözlemlendiğinde; servis araçlarının trafiğe çıkmaması ve okul sebebiyle yola çıkan hususi taşıtların trafikten çekilmesi sebebiyle trafik yoğunluğu önemli

ölçüde azalmakta olup özellikle Milli Eğitim Bakanlığı tatil sezonları, kazı çalışmaları açısından en uygun dönemlerdir. Kazı çalışmalarının özellikle bu dönemlerde yapılmasının teşvik edilmesi açısından puanlamada bu dönemlere karşılık gelen günler için normal gün puan değerinin 2 katı puan verilmesi öngörülmüştür. Kazı çalışma sürelerinin birden fazla gün olduğu durumlarda ise her bir çalışma gününe ait puanlar toplanarak çalışılan gün sayısına bölünmüş ve aritmetik ortalama değeri esas alınmıştır. Formülizasyon Microsoft Excell kullanılarak yapılmış olup ilgili değerler Ek A'da sunulmuştur.

Gerçekleştirilen çalışma ve puanlama sistemi İstanbul İli, Fatih İlçesi için geliştirilmiş olup özellikle yaz aylarında trafik yoğunluğunun yaşandığı tatil bölgelerinde veya iklimsel koşulların kazı çalışmalarını etkileme ihtimali bulunan bölgelerde yöresel farklılıkların gözetilerek bu duruma uygun bir puanlama sistemi oluşturulması gerekmektedir.

3.4.4. Yol Gruplandırma (Road Grouping)

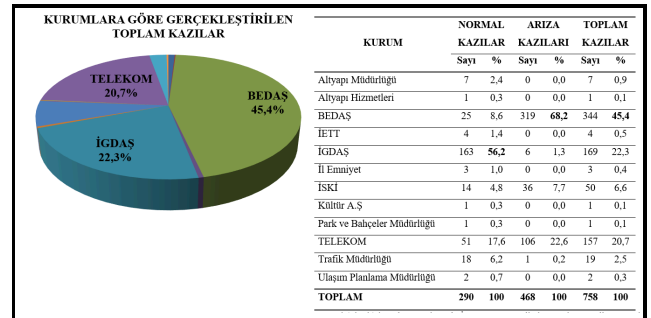
Söz konusu kazı başvuruları ana arterler (bulvar/cadde) ile ana arterler dışında kalan yolların (sokak, tali yol, yaya yolu, trafiğe kapalı yol vb.) oluşturduğu mahalleler şeklinde ayrılarak gruplandırılmıştır. Çünkü sadece sokak/cadde bazında ele alındığında “yolun önemi” kazı müracaatlarının değerlendirilmesinde bir etken olarak yer almayacak ayrıca o civardaki trafiğin yeniden engellenmesi ve civarda yaşayanların kazı çalışmaları neticesinde ortaya çıkacak olan gürültü ve görüntü kirliliğinden etkilenmesi söz konusu olacaktır. Buna göre yol gruplandırması yapılmış kazı bilgileri ve durulaştırma neticesinde elde edilen “ bulanık puanlı zeki çizelgeleme” Ek B’de sunulmuştur.

Arıza kazılarının önceden planlı olmaması, arızaların vakit geçirilmeksizin giderilmesinin zorunluluğu gibi sebeplerden ötürü arıza kazıları bulanık öncelik sıralamasında dikkate alınmamıştır. Bu çalışmanın hedefi, pratiğe uygulanabilir bir metodoloji oluşturmak olup dikkate alınacak parametrelerin seçiminde karar mekanizmalarının tercihleri, bölgeler arasındaki uygulama farklılıkları, trafik ve iklimsel değişiklikler ile zaman içerisinde değişebilecek koşullar etkili olacaktır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

2012 yılında İstanbul İli, Fatih İlçesi’nde gerçekleştirilmiş olan kazılara ait verilerin değerlendirilmesi sonucunda ortaya çıkan neticeler aşağıda ifade edilmiştir;

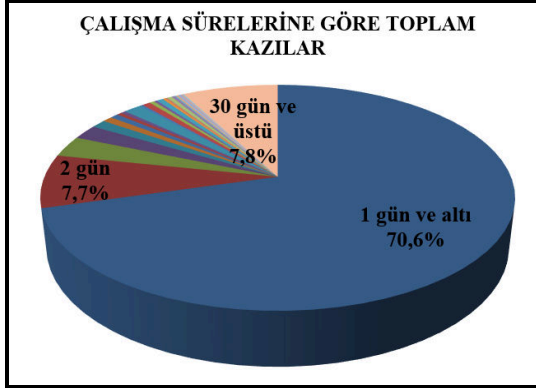
Şekil 13’de 2012 yılı içerisinde hangi kurumun kaç adet kazı ruhsatı talebinde bulunduğu gösterilmektedir. Buna göre; normal (planlı) kazı başvurularında İGDAŞ % 56,2 ile hemen hemen diğer tüm kurumların gerçekleştirdiği kazıların toplamından daha fazla kazı gerçekleştirmiştir. Ancak arıza kazılarına bakıldığında ise; İGDAŞ %1,3 ile çok küçük bir oranda kazı gerçekleştirmiş olup buradan hareketle İGDAŞ’ın oldukça yüksek miktarda talebe bağlı arz gerçekleştirdiği ancak buna rağmen diğer kurumlara nazaran çok daha planlı çalışmalar yaptığı ve bakım-onarım çalışmalarını düzenli olarak gerçekleştirmesi sebebiyle altyapı arıza durumlarının asgariye indirildiği gözlenmiştir. Tam tersi BEDAŞ’ın normal (planlı) çalışmaları % 8,6 iken arızaya bağlı kazılar % 68,2 gibi oldukça yüksek bir orandır. Buradan hareketle, BEDAŞ’ın diğer kurumlara nazaran daha plansız çalışmalar yaptığı, bakım-onarım çalışmalarını düzenli olarak gerçekleştirmemesi ya da malzeme seçimi, imalat kalitesi gibi sebeplere bağlı olarak çok sık altyapı arızalarının ortaya çıktığı gözlenmiştir. Toplam kazılar incelendiğinde ise BEDAŞ % 45,4 ile en yüksek paya sahip olup, %22,3 ile İGDAŞ ikinci sırada ve %20,7 ile TELEKOM üçüncü sırada yer almaktadır.



Şekil 13. Kurumların kazı talepleri (Excavation demands of infrastructure organizations)

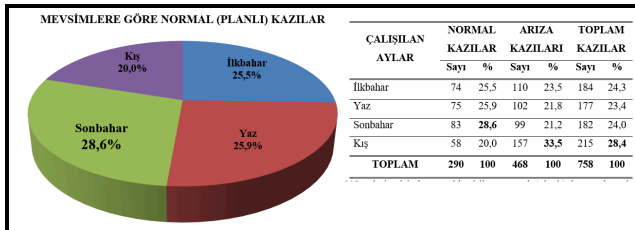
Şekil 14’de 2012 yılı içerisindeki kazı çalışması süreleri yüzdesel değerleri grafik üzerinde gösterilmektedir. Buna göre; normal (planlı) kazıların % 29,7’si 1 gün ve altındaki sürelerde, % 20,3’ü 30 gün ve üstü sürelerde, % 14,1’i ise 2 günlük sürelerde gerçekleştirilmiştir. Arıza kazılarının % 95,9 gibi oldukça yüksek bir oranı 1 gün ve altındaki sürelerde gerçekleştirilmiştir.

Toplam kazılara bakıldığında ise 1 gün ve altında gerçekleştirilen çalışmalar toplam çalışmaların % 70,6'sını, 30 gün ve üstünde gerçekleştirilen çalışmalar toplam çalışmaların % 7,8'ini, 2 gün süresinde gerçekleştirilen çalışmalar ise toplam çalışmaların %7,7'sini oluşturmaktadır. Normal (planlı) kazılar daha uzun sürelerde gerçekleştirilebilmekte iken arıza kazıları genel olarak 1 gün ve altındaki kısa süreler içerisinde gerçekleştirilmektedir.



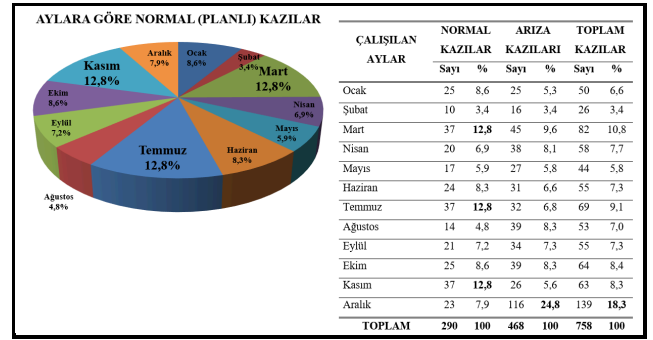
Şekil 14. Çalışma sürelerine göre toplam kazılar (Excavation working span)

Şekil 15'de 2012 yılı içerisindeki kazı taleplerinin mevsimlere göre dağılımı gösterilmektedir. Buna göre; normal (planlı) kazılar en fazla % 28,6 ile sonbaharda, en az % 20,0 ile kış mevsiminde gerçekleşmekle birlikte genel olarak çalışmaların mevsimlere hemen hemen dengeli bir şekilde dağıldığı gözlenmektedir.



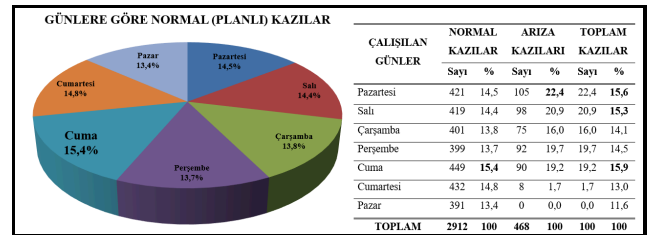
Şekil 15. Kazıların mevsimlere dağılımı (Distribution of excavations depending on seasons)

Şekil 16'da 2012 yılı içerisindeki kazı taleplerinin aylara göre dağılımı gösterilmektedir. Buna göre; normal (planlı) kazılar % 12,8 ile en fazla Mart, Temmuz ve Kasım aylarında gerçekleşmekle birlikte genel olarak çalışmaların aylara dengeli bir şekilde dağıldığı çok büyük farklar oluşmadığı gözlenmiştir. Ancak AYKOME tarafından alınan 22.11.2011 tarih ve 4832705 sayılı karar gereği arıza ve zorunlu haller dışında 01.12.2011-15.03.2012 tarihleri arası uygulanması gereken kazı yasağının "zorunlu haller" ibaresi gereği 50 kez ihlal edildiği gözlenmiş olup bu durum yol altyapısı çalışmalarındaki koordinasyonsuzluk ve plansızlığın önemli göstergelerinden biridir.



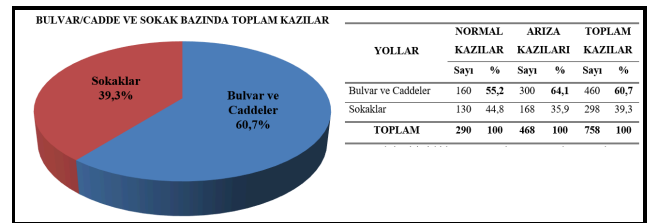
Şekil 16. Kazıların aylara dağılımı (Distribution of excavations depending on months)

Şekil 17'de 2012 yılındaki kazı çalışmalarının günlere göre dağılımı gösterilmektedir. Buna göre; normal kazılar %15,4 ile en fazla cuma günlerinde gerçekleştirilmiş ancak genel olarak çalışmaların günlere dengeli bir şekilde dağıldığı, çok büyük farklar oluşmadığı gözlenmiştir.



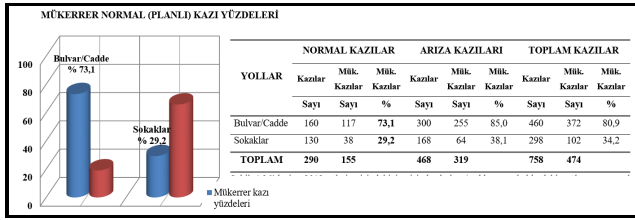
Şekil 17. Kazıların günlere dağılımı (Distribution of excavations depending on days)

Şekil 18'de 2012 yılındaki kazı taleplerinin bulvar/cadde ve sokak bazında gerçekleşme rakamları gösterilmektedir. Normal kazıların % 55,2 si anaarterleri oluşturan bulvar ve caddeler üzerinde, arıza kazılarının % 64,1'i bulvar/caddeler üzerinde, toplam kazı çalışmalarının ise % 60,7'si bulvar/caddeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Sokaklarda bu oran % 39,3 olup çalışmaların büyük bir çoğunluğu ana arterlerde gerçekleştirilmiştir. Kazıların trafiğin yoğun olduğu ve kaplama kalitesinin diğerlerine nazaran daha yüksek olduğu anaarterlerde yapılmış olması hem trafik akışının kısıtlanması hem de kaplamada meydana gelecek deformasyonların giderilme maliyeti açısından özellikle anaarterler üzerinde kazı ruhsat onaylarının verilmesinde göz önüne alınmalıdır.



Şekil 18. Bulvar/cadde ve sokak bazında kazılar (Excavations on boulevard/main street and street)

Altyapı kurumları, koordinasyon eksikliği nedeniyle aynı cadde veya sokaklarda yıl içerisinde farklı zamanlarda tekrarlı kazılar gerçekleştirmektedirler. Şekil 19'da 2012 yılı içerisinde bulvar/cadde ve sokaklardaki mükerrer kazıların normal kazılar, arıza kazıları ve toplam kazılar içerisindeki oranları görülmektedir. Buna göre; 2012 yılı içerisinde bulvar ve caddelerde gerçekleştirilmiş 160 normal (planlı) kazı çalışmasının %73,1'i aynı yıl içerisinde daha önce kazı çalışması yapılmış bulvar/cadde üzerinde tekrarlanmış kazılardan oluşmaktadır. Sokaklarda ise gerçekleştirilmiş 130 normal (planlı) kazı çalışmasının %29,2'si aynı yıl içerisinde daha önce kazı çalışması yapılmış sokaklar üzerinde tekrarlanmış kazılardan oluşmaktadır.



Şekil 19. Mükerrer kazı yüzdeleri (Repeated excavations)

Tablo 3'de 2012 yılı içerisinde mükerrer kazı yapılan aynı bulvar/cadde ve sokaklarda kazının ortalama tekrarlanma oranları verilmiştir. Buna göre; mükerrer kazı yapılan bulvar/caddelerin her birinde ortalama 3,7 kez normal (planlı) kazı yapıldığı, bu oranın mükerrer kazı yapılan sokakların her birinde ise ortalama 2,0 kez olduğu gözlenmektedir. Buradan hareketle mükerrer kazıların özellikle trafiğin yoğun olduğu ve kaplama kalitesinin diğerlerine nazaran daha yüksek olduğu anaarterlerde yapılmış olması hem trafik akışının defalarca kısıtlanması hem de kaplamada meydana gelecek tekrarlı deformasyonların giderilme maliyeti açısından ele alındığında büyük bir handikap oluşturmaktadır olup özellikle anaarterler üzerinde kazı ruhsat onaylarının verilmesinde göz önüne alınması gereken önemli bir husustur.

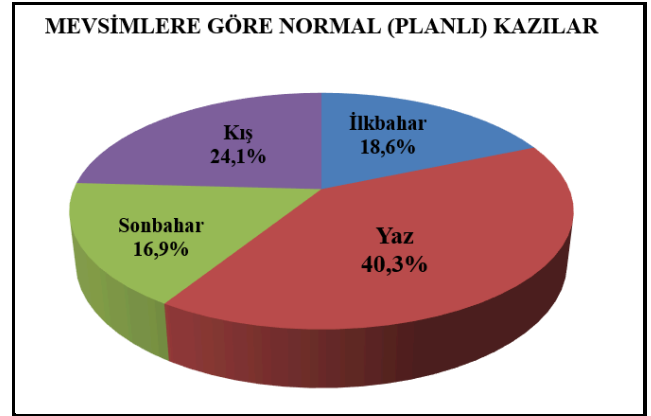
Tablo 3. Bulvar/cadde ve sokaklardaki mükerrer kazıların ortalama tekrarlanma oranları (Average repeating rates of excavations on the same road)

YOLLAR	NORMAL KAZILAR			ARIZA KAZILARI			TOPLAM KAZILAR		
	Kazılan Yollar	Mük. Kazılar	Mük. Kazılar	Kazılan Yollar	Mük. Kazılar	Mük. Kazılar	Kazılan Yollar	Mük. Kazılar	Mük. Kazılar
	Sayı	Sayı	Ort.	Sayı	Sayı	Ort.	Sayı	Sayı	Ort.
Bulvar/Cadde	32	117	3,7	54	255	4,7	86	372	4,3
Sokaklar	19	38	2,0	29	64	2,2	48	102	2,1
TOPLAM	51	155		83	319		134	474	

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (CONCLUSIONS AND DISCUSSION)

Çalışma kapsamında; altyapı çalışmalarında kurumlararası koordinasyonu sağlamak amacıyla üst kurum olan AYGOME ile ilgili diğer altyapı kurumları tarafından kullanılması planlanan coğrafi bilgi sistemi tabanlı bir altyapı yönetim sistemi yazılımı (KENTSİS) geliştirilmiştir. Bu yazılımın kullanımı ve koordinasyonun sağlanması ile tekrarlı kazılar neticesinde ortaya çıkacak olan yol üstyapısının deformasyonun ortadan kaldırılması, yolun trafik kapasitesinin düşmesi, zaman ve ekonomik kayıpların önlenmesi sağlanmış olacaktır. Bu kapsamda kent içi yol altyapısı kazılarının önceliklendirilmesi için KENTSİS yazılımına entegre olacak şekilde yol, süre, gün değişkenleri kullanılarak oluşturulan bulanık mantık karar destek sistemi de geliştirilmiş olup elde edilen veriler aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

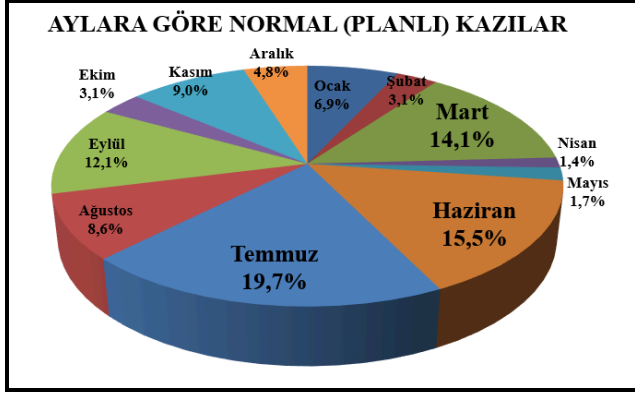
Kazı çalışmaları mevsimlere göre değerlendirildiğinde; Şekil 20'de görüldüğü üzere modelimizin uygulanması neticesinde normal (planlı) kazı çalışmalarının % 40,3 gibi oldukça büyük bir miktarı; günlerin kısa olduğu, iklime bağlı çalışma koşullarının güç olduğu kış mevsimi yerine günlerin uzun olduğu, tatil sezonunu da içeren buna bağlı olarak trafik yoğunluğunun az olduğu, yol üstyapısında yama/kazı çukuru/kaplama çalışmaları için uygun iklimsel koşulları içeren yaz mevsiminde gerçekleşmiştir.



Şekil 20. Modelleme sonrası mevsimlere göre normal (planlı) kazılar (Distribution of excavations depending on seasons after fuzzy modeling)

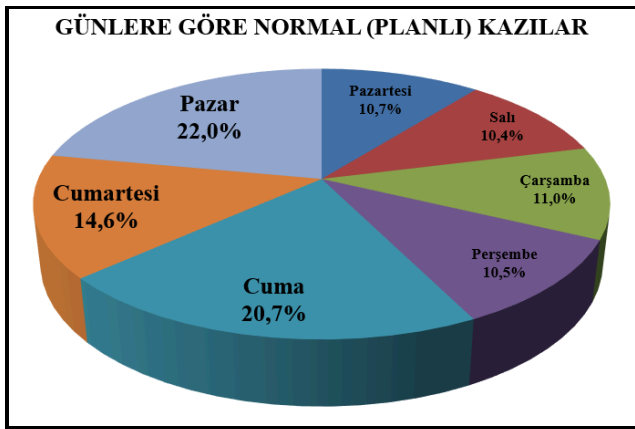
Kazı çalışmaları aylara göre değerlendirildiğinde; Şekil 21'de görüldüğü üzere modelimizin uygulanması neticesinde, normal (planlı) kazı çalışmaları en fazla %19,7 ile temmuz ayında ve daha sonra % 15,5 ile haziran ayında gerçekleştirilmiş olup genel olarak günlerin kısa

olduğu, iklime bağlı çalışma koşullarının güç olduğu kış ayları yerine günlerin uzun olduğu, tatil sezonunu da içeren buna bağlı olarak trafik yoğunluğunun az olduğu, yol üstyapısında yama/kazı çukuru/kaplama çalışmaları için uygun iklimsel koşulları içeren yaz ve bahar aylarında gerçekleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 21. Modelleme sonrası aylara göre normal (planlı) kazılar (Distribution of excavations depending on months after fuzzy modeling)

Kazı çalışmaları haftanın günlerine göre değerlendirildiğinde; Şekil 22’de görüldüğü üzere modelimizin uygulanması neticesinde; normal (planlı) kazı çalışmalarının % 22’si “en iyi gün” olarak tanımlanan pazar günlerinde gerçekleştirilmiştir. Modelimizde önermiş olduğumuz üzere, kazı başvurularının gün yerine saat olarak alınmaya başlanmasıyla birlikte diğer günlerde gerçekleştirilecek olan kısa süreli kazı çalışmalarının da trafiğin zirve yaptığı pik saatler dışına kaydırılması ile çok daha verimli sonuçlar elde edilmesi öngörülmekte olup 2012 yılı kazı çalışmalarına ait saat bazında veri olmaması nedeniyle herhangi bir karşılaştırma yapılamamıştır.



Şekil 22. Modelleme sonrası günlere göre normal (planlı) kazılar (Distribution of excavations depending on days of week after fuzzy modeling)

2012 yılı içerisinde bulvar ve caddelerde gerçekleştirilmiş 160 normal (planlı) kazı çalışmasının %73,1’i aynı yıl içerisinde daha önce

kazı çalışması yapılmış bulvar/cadde üzerinde tekrarlanmış kazılardan oluşmaktadır. Sokaklarda ise; gerçekleştirilmiş 130 normal (planlı) kazı çalışmasının %29,2’si aynı yıl içerisinde daha önce kazı çalışması yapılmış sokaklar üzerinde tekrarlanmış kazılardan oluşmaktadır. Ayrıca mükerrer kazı yapılan bulvar/caddelerin her birinde ortalama 3,7 kez normal (planlı) kazı yapıldığı, bu oranın mükerrer kazı yapılan sokakların her birinde ise ortalama 2,0 kez olduğu görülmüştür. Buradan hareketle mükerrer kazıların özellikle trafiğin yoğun olduğu ve kaplama kalitesinin diğerlerine nazaran daha yüksek olduğu anaarterlerde yapılmış olması hem trafik akışının defalarca kısıtlanması hem de kaplamada meydana gelecek tekrarlı deformasyonların giderilme maliyeti açısından ele alındığında büyük bir handikap oluşturmaktadır özellikle anaarterler üzerinde kazı ruhsat onaylarının verilmesinde göz önüne alınması gereken önemli bir husustur. Modelimizde uygulanan yol gruplandırılması neticesinde 2012 yılında bulvar/caddelerde gerçekleştirilmiş olan 160 adet normal (planlı) kazı çalışması birleştirilerek 75 adet kazı çalışmasına düşürülmüş, sokaklarda gerçekleştirilmiş olan 130 adet adet normal (planlı) kazı çalışması birleştirilerek 41 adet kazı çalışmasına düşürülmüş ayrıca yıl içerisinde aynı yol grubu içerisinde ikinci bir defa kazı çalışmasına izin verilmemesi sebebiyle mükerrer kazı oranları normal (planlı) kazılar için % 0 olarak gerçekleşmiştir.

Çalışmada, “bulanık mantık” yöntemi kullanılarak bir altyapı kazı modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin altyapı yönetim sistemi yazılımına entegre olabilecek, zeki çizelgeleme yapabilecek ve pratikte uygulanabilir olması hedeflenmiştir. Buna bağlı olarak gerçekleştirilecek kazı çalışmalarının zamanlamasının belirlenmesinde kişisel insiyatifler rol oynamayacak, olası suiistimaller önlenebilecek, hem sebep olacağı trafik artışı hem de üstyapıya vereceği tahribat gözetilerek en optimum zaman ve sürede sonuçlandırılacaktır. Kazı ruhsat başvurularının doğru ve verimli bir şekilde değerlendirilebilmesi için “öncelik” kavramının doğru bir şekilde tanımlanması ve kullanılması gerekmektedir. Bunun için de başvurulardan hangilerinin geciktirilebileceği veya öne alınabileceği gerçekçi seçim kriterleri ile açık olarak belirlenmiştir. Modelimizdeki ilgili parametrelerin seçiminde karar mekanizmalarının tercihleri, bölgeler arası uygulama farklılıkları, trafik ve iklimsel değişiklikler ile zaman içerisinde değişebilecek

koşullar etkili olacak olup güncellenebilir niteliktedir.

Söz konusu modelde ilgili kurumlar ruhsat başvurularından yüksek puan alıp çalışmalarına öncelik kazandırmak amacıyla çalışmalarını daha kısa sürelerde, daha uygun günlerde yapmak isteyecek, trafiğin yoğun olduğu ana arterlerdeki çalışmalarını ise birleştirerek tek seferde yapmanın yolunu arayacak bu da beraberinde, kurumların kendi rızasıyla daha planlı kazı programları yapması sonucunu doğuracaktır.

Arıza kazılarının önceden planlı olmaması, arızaların vakit geçirilmeksizin giderilmesinin zorunluluğu gibi sebeplerden ötürü arıza kazıları bulanık öncelik sıralamasında dikkate alınmamıştır. Ancak geçmiş arıza verileri dikkate alınarak arıza kazılarının daha ziyade hangi bölgelerde yoğunlaştığı, arızaların yoğun olduğu bölgelerde hat yenileme çalışmalarının gerekliliği gibi bir takım analizler neticesinde daha sağlıklı planlamalar yapılabilecek, aynı bölgedeki arıza kazılarının çok sık tekrarlanması sebebiyle gerektiğinde ilgili kurumlara uyarı veya yaptırımlar uygulanabilecektir.

Çalışmada pilot bölge olarak İstanbul İli Fatih İlçesi'nde 2012 yılı içerisinde gerçekleştirilmiş olan yol altyapısı kazılarının koordinasyonu ve önceliklendirilmesi sağlanmış olup bu sürenin daha uzun tutulması (3-5 yıl), tüm İstanbul geneline yayılması ve maliyet analizleri ile desteklenmesi neticesinde daha verimli ve daha dikkate değer sonuçların elde edilebileceği görülmektedir.

KENTSİS yazılımının ilgili kurumlarca kullanımının sağlanması için bir altyapı uygulama yönetmeliğinin hazırlanması gerekmektedir olup uzun vadeli altyapı yönetim sistemi planlamalarının gerçekleştirilebilmesi için siyasi iradenin kararlılığı da son derece önem arz etmektedir.

EKLER (APPENDICES)

EK A: İstanbul İli, Fatih İlçesi, 2012 yılı kazı bilgileri ve bulanık değişken puan değerleri

EK B: İstanbul İli, Fatih İlçesi, 2012 yılı yol gruplandırması yapılmış kazı bilgileri ve bulanık puanlı zeki çizelgeleme



TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma İstanbul Teknik Üniversitesi 37515 protokol numaralı Bilimsel Araştırma Projesi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Waheed U., Ralph H., Hudson, W.H., Infrastructure Management: Integrating Design, Construction, Maintenance, Rehabilitation and Renovation. New York, McGraw-Hill, 1997.
- [2] Erdemli M., Effects of infrastructure on urban development (Doktora tezi). Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1999.
- [3] Goodman A.S., Makarand H. Infrastructure Planning Handbook: Planning, Engineering and Economics. Reston, VA, American Society of Civil Engineers, 2006.
- [4] TS 10618 Şehir İçi Yolları Teknik Alt Yapı Tesisleri Planlama ve Yerleştirme Kuralları standardı, 1993.
- [5] Yayla N., Karayolu Mühendisliği, İstanbul, Birsen Yayınevi 2009.
- [6] Ongel A., Harvey J., Analysis of 30 Years of Pavement Temperatures Using the Enhanced Integrated Climate Model. California Department of Transportation 2004.
- [7] Tataroğlu M., Kamu yönetiminde coğrafi bilgi sistemi teknolojisi ve etik, Finans Politik, 50, 2007.
- [8] Sayıştay Başkanlığı, Büyükşehir Belediyelerinde Altyapı Faaliyetlerinin Koordinasyonu Raporu. Ankara: Sayıştay Başkanlığı, 2008.
- [9] <http://www.haberler.com>, erişim tarihi 18.05.2014.
- [10] Sipos C., Mirza S., Location and Evaluation of Underground Infrastructure: Inventory, Condition Assessment and Diagnosis. Saarbrücken, Germany, 2008.
- [11] <http://www.apwa.net/Resources/Reporter/Articles/2005/2/Challenges-in-designing-and-implementing-a-comprehensive-work-management-system>, 01.06.2014.

- [12] Sarja A., Predictive and Optimised Life Cycle Management: Building and Infrastructure. London and New York, Taylor&Francis, 2009.
- [13] Adeli H., Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. Cambridge MA, Blackwell 2011.
- [14] Turabi A., Kentsel yerleşim alanlarında altyapı ve üstyapı oluşumunun araştırılması (Doktora tezi). Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 1998.
- [15] Boyacıoğlu H., Alpaslan M.N., Türkiye’de altyapı tesislerinin mevcut durumunun belediyeler ölçeğinde değerlendirilmesi. Çevre Bilim Teknoloji Dergisi, Cilt 2, 10-16, 2003.
- [16] Sakız A., Coğrafi bilgi sistemleri ile altyapı uygulamaları ve analizi (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2003.
- [17] Karataş K., Kentsel teknik altyapı tesisleri, kadastrosu ve Türkiye’deki uygulamaların organizasyonu (Doktora tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2007.
- [18] Dinçyılmaz A., Altyapı bilgi sistemlerinde mobil CBS uygulamaları, (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
- [19] Murat Y.Ş., Gedizlioğlu E., A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions. Transportation Research Part C: Emerging Technologies,19-36 2005.
- [20] Subaşı S., Beycioğlu A., Emiroğlu M. Hafif Betonlarda Donatı Aderansı Dayanımının Bulanık Mantık Yöntemi ile Modellenmesi. Akıllı Sistemlerde Yenilikler ve Uygulamaları Sempozyumu 2008.
- [21] <http://www.mathworks.com/help/matlab/>, erişim tarihi 01.03.2013.
- [22] Bayır R., Bay Ö.F., Marş motoru akım sinyalleri wavelet analiz sonuçlarının bulanık mantık ile sınıflandırılarak arıza tespiti. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi cilt 22, no 2, 363-374. 2007.
- [23] Ross T.J., Fuzzy Logic With Engineering Applications. England, John Wiley & Sons Inc. 2004.
- [24] Uusoy G., Soydan N., Design and implementation of a maintenance planning and control system. International Journal of Production Economics, s.24, 263-272, 1992.
- [25] Karayolu Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul 2001.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 09-10-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.342519	
	<u>Kabul/Accepted</u> 21-12-2017	<u>Online Access</u>	

Büzülme engelleyici katkıların harç karışımlarının basınç dayanımına, su emmesine ve kuruma-büzülmesine etkisi

Ali Mardani-Aghabaglou*¹, Metin İlhan¹

ÖZ

Bu çalışmada, kuruma büzülme engelleyici (KBE) katkı içeren harç karışımlarının basınç dayanımı, su emme oranı ve kuruma büzülmesi incelenmiştir. Bu amaçla, 4 farklı fabrika ürünü 9 adet toz ve sıvı halinde katkı kullanılmıştır. Tüm harç karışımlarında bağlayıcı olarak CEMI 42.5 R tipi çimento ve agrega olarak standart kum kullanılmıştır. KBE katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten çimento ağırlığının %2'si kadar KBE katkı kullanılarak toplamda 10 seri karışım hazırlanmıştır. Üretilen tüm harç karışımlarında, kum/bağlayıcı oranı, su/çimento (S/Ç) oranı ve yayılma değeri sırasıyla, 2.75, 0.485 ve 230±20 mm olarak sabit tutulmuştur. Hedeflenen yayılma değerlerini sağlamak için tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Hazırlanan harç karışımlarının 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları ve 28 günlük su emme oranı elde edilmiştir. Ayrıca söz konusu karışımların 28 günlük kuruma büzülme davranışı incelenmiştir.

Deney sonuçlarına göre, kontrol karışımına kıyasla, KBE katkı kullanımı ile harç karışımlarının basınç dayanımı ve geçirgenlik özellikleri genel olarak olumlu etkilenmiştir. Ancak, 2 farklı KBE katkı kullanımı harç karışımlarının priz almamasına sebep olmuştur. Söz konusu karışımlarda su azaltıcı katkı kullanılmamıştır. Ayrıca, KBE katkı kullanımı ile harç karışımlarının kuruma büzülme değerlerinde %10-%45 oranında azalmalar tespit edilmiştir. Sıvı halinde olan KBE katkıları genel olarak toz halinde olan katkılara kıyasla kuruma-büzülme davranışı açısından daha başarılı olmuştur.

Anahtar Kelimeler: harç karışımları, kuruma-büzülme engelleyici katkı, su emme kapasitesi, basınç dayanımı

Effect of shrinkage reducing admixture on compressive strength, water absorption and drying-shrinkage of mortar mixture in the presence of water reducing admixture

ABSTRACT

In this study, compressive strength, water absorption and drying-shrinkage behaviour of shrinkage-reducing admixture (SRA) bearing mortar mixture were investigated. For this purpose, 9 powder and liquid commercial SRA admixtures provided from 4 different factories were used. In all mortar mixture, CEM I 42.5 R type cement as binder and standard sand as aggregate were used. In addition to the containing no SRA admixture, 10 different mortar mixtures were produced by using SRA admixture as 2 wt.% of the

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: alimardani@uludag.edu.tr

¹Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,

cement. In all mortar mixtures, water/cement ratio, sand/binder ratio and flow value were kept constant as 0.485, 2.75 and 230 ± 20 mm, respectively. A type of polycarboxylate-ether based high range water reducing admixture was used for providing the desired flow values. 1, 3, 7 and 28-day compressive strength and 28-day water absorption of mortar mixtures were obtained. Also, the 28-day drying-shrinkage of mortar mixtures was measured.

Test results demonstrated that utilization of SRA positively affected compressive strength and permeability of the mortar mixtures. However, utilization of SRA led to incompleteness of setting time of mortar mixtures. In the mentioned mortar mixtures, water reducing admixture was not used. In addition, a reduction of %10-%45 was found in drying shrinkage value of mortar mixtures by utilization of SRA. The liquid types of SRA generally were more successful compared to the powder types in term of drying-shrinkage behaviour of mortar mixtures.

Keywords: mortar mixture, drying-shrinkage reducing admixture, water absorption capacity, compressive strength

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bilindiği gibi beton karışımlarının mukavemetini azaltan olumsuz etkenlerden biri rötredir. Betonun büzülmesi şeklinde tanımlanan rötre, betonda yüzeysel veya derin çatlaklar meydana getirir. Çatlaklar sonucu beton numunesinin geçirgenlik özellikleri ve dayanımı olumsuz şekilde etkilenmektedir. Betonarme yapılarda beton fazı, yapının basınç dayanımını karşılama yanında, pasif tabaka oluşturduğundan (CH'ların varlığından bazik ortam oluşur) donatıyı korozyona karşı da korur. Ancak, rötre sonucu beton karışımının geçirgenliği arttığından hava, su ve kimyasal maddeler rahatlıkla betona girebileceğinden, donatı korozyon oluşumuna veya beton dayanıklılığının azalmasına neden olmaktadır [1]. Bu yüzden rötre hem statik hem de estetik olarak kötü sonuçlara neden olabilir.

Betonun priz alma esnasında beton yüzeyindeki suyun buharlaşması sonucu büyük boşluklarda bulunan su yüzeye hareket ederek buharlaşır. Ortamın bağıl nemi çok düşük ise veya ortam sıcaklığı çok yüksek ise betonun büyük boşluklarındaki su buharlaştıktan sonra katmanlar arası küçük boşluklardaki sular kılcal yollarla büyük boşluklara hareket eder. Böylece katmanlar arası basınç oluşturan su kaybolduğundan katmanlar birbirine yakınlaşır. Dolayısıyla, bir büzülme oluşumu söz konusu olur. Büzülmeden kaynaklı bir iç gerilme doğar. Oluşan bu gerilme, çimentolu sistemlerin çekme dayanımını aşar ise çatlak oluşur [2]. Betonun rötresini çimento pastasının boşluk oranı, yaşı, hidrasyon derecesi, su/çimento oranı, kür sıcaklığı, çimento içeriği, su içeriği, katkıların özellikleri (kimyasal ya da mineral gibi özellikleri), betonun agrega rijitliği,

agrega içeriği, hacim/yüzey oranı, kalınlığı gibi özellikleri etkilemektedir [3].

Taze betonda işlenebilirlik, sertleşmiş betonda ise dayanım ve dayanıklılık özellikleri betonda aranan en önemli özelliklerdir. Betonun kuruma büzülmesi ve dolayısıyla oluşan çatlaklar dayanım ve dayanıklılığı olumsuz etkiler ve servis ömrü yüksek kaliteli bir beton üretilmesini engeller. Bu çatlakları engellemek için su/çimento oranını azaltmak, KBE ve mineral katkı kullanmak gibi yöntemler mevcuttur [4-5]. Su/çimento oranını azaltmak ve mineral katkı kullanmak, taze betonda en çok aranan özelliklerden biri olan işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir. Su azaltıcı katkı kullanmak her ne kadar işlenebilirliği arttırsa da karışımların büzülmesini azaltmak için son yıllarda tercih edilen diğer bir yöntem ise KBE katkı kullanmaktır. Rötre azaltıcı katkı maddeleri düşük viskoziteye sahip maddelerdir ve bu sebeple suya %1 oranında eklenmesi durumunda dahi yüzey gerilmelerinde %30 oranında azalma sağlamaktadır. Rötre azaltıcı katkıları kapiler boşluklarda var olan sudaki gerilmelerin oluşumunu azaltmakta ve böylece suyun dışarı çıkışı engellenmektedir. Bu sayede sünmeye neden olacak gerilmeler azaldığı için sünmeyi de azaltmaktadır ve çatlak oluşumu engellenmektedir [6]. Konu ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kadıoğlu [5] yaptığı bir çalışmada, KBE katkının beton karışımlarının elastisite modülüne etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, 2 farklı su/çimento oranına sahip beton karışımları hazırlamıştır. Sonuçlara göre, KBE katkı kullanımı beton karışımlarının elastisite modülünü ciddi mertebede etkilememiştir.

Gu [7] ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, NanoSio₂ 'in (NS) çimento hamurundaki dağılımını geliştirmek amacıyla NS yüzeyine kuruma-büzülme engelleyici katkı (KBE) graft edilerek yeni bir çekirdek-kabuk parçaçığı (NS+KBE) sentezlemiştir. Yazarlar, bu yeni sentezin çimento hamurunun rötresine ve basınç dayanımına etkisini araştırmıştır. Bu amaçla, NS, KBE ve NS+KBE katkısı içeren 3 farklı seri karışım hazırlamışlardır. Deney sonuçlarına göre NS+KBE katkı kullanımı karışımların özellikle ileri yaşlardaki dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. Çimento hamurunun otojen rötresini önemli ölçüde arttıran geleneksel NS'den farklı olarak NS+KBE katkısı çimento hamurunun otojen rötresini belirgin bir şekilde etkilemediği yazarlar tarafından beyan edilmiştir.

Diğer bir çalışmada Bloom ve Bentur [8] yüksek ve normal dayanımlı beton karışımlarında kuruma-büzülme davranışını incelemiştir. Bu amaçla düşük ve yüksek su/çimento oranına sahip 2 seri beton karışımı hazırlamıştır. Yazarlar, beton karışımının dayanımı arttıkça betonda oluşan içsel gerilme miktarının arttığını iddia etmiştir.

Wehbe ve Ghahremaninezhad [9] yaptığı bir çalışmada, süper emici polimerlerin (SAP) ve kuruma-büzülme engelleyici (KBE) katkıların çimentolu sistemlerin otojen rötresine ve mikro yapısına etkisini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre çimento hamurunda KBE katkı kullanımının SAP emilimini azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca KBE katkı ve SAP'lerin birlikte kullanıldığı çimento hamuru karışımlarının sadece SAP içeren hamur karışımlarına göre özellikle erken yaşlarda daha fazla büzülme sergilediği belirtilmiştir.

Lopez [10] yaptığı çalışmalarda, yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı hafif betonların sünme ve rötresini araştırmıştır. Hafif betonun sünmesinin normal betona göre daha az ve rötresinin ise daha fazla olduğu sonucuna varmıştır.

Zuo [11] ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada su azaltıcı fonksiyonu olan yeni bir polimer tipi KBE katkının çalışma mekanizmasını araştırmıştır. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla geleneksel KBE katkı ve yeni nesil polimer tipli KBE katkı içeren karışımlar hazırlamıştır. Deney sonuçlarına göre, erken yaşlarda genleşme periyoduna sahip olan poli-ether tipi geleneksel KBE katkı içeren karışımların aksine polimer tipi KBE katkı içeren karışımlarda daha yavaş ve monoton bir büzülme gelişimi gözlemlendiği ifade edilmiştir.

Folliard ve Berke [4] ile Ruacho vd. [12] tarafından yapılan çalışmalarda, KBE katkı kullanımının hem normal hem de yüksek dayanımlı betonların geçirimsizliği ve çatlak oluşumu üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu araştırmalarda söz konusu katkı oranı bağlayıcı ağırlığının %1.5'i olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre KBE katkı kullanımının geçirimsizliği azalttığı ve çatlak oluşumunu engellediği tespit edilmiştir.

Deboodt [13] ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, harç karışımlarının otojen rötresini ve beton prizmaların kuruma-büzülme davranışını incelemiştir. Tüm karışımlarda ince hafif agregalar kullanılmıştır. Kontrol karışımına ilaveten, agreganın nem durumu ve KBE katkı kullanımına bağlı olarak 3 farklı seri karışım hazırlamıştır. 1. seride, ince hafif agregalar önceden ıslatılarak kullanılmıştır. 2. seride, KBE katkı karışıma ilave edilmiştir. 3. seride ise KBE katkı ve önceden ıslatılmış ince hafif agregalar kombinasyonu olan karışım üretilmiştir. Deney sonuçlarına göre, KBE katkı ve önceden ıslatılmış ince hafif agregaların kombinasyonu olan karışımın otojen rötreyi azaltmada en etkili karışım olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca söz konusu karışımın kontrol karışımına kıyasla %84 daha az büzülme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.

Rongbing ve Jian [14] ile Quangphu vd. [15] tarafından yapılan çalışmalarda, farklı oranlarda KBE katkı kullanılarak üretilen betonların kuruma büzülme davranışları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. KBE katkı kullanım oranı arttıkça betonların çatlama miktarlarında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca söz konusu katkı kullanımı betonların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemiştir ve katkı kullanım oranı artışı ile birlikte betonların mekanik özelliklerinin zayıfladığı belirlenmiştir.

Tioua [16] ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, hurma ağacı lifi (HAL) ve KBE katkı kullanımının kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımlarında nihai ve erken yaş büzülme davranışına etkisini incelemiştir. Bu amaçla toplam hacmin %0.1 ve %0.2'si HAL ve çimento ağırlığının %2'si oranında KBE katkı kullanılarak 14 farklı KYB karışımı hazırlamıştır. Deney sonuçlarına göre, HAL'nin kuru-ıslak çevrimlerine maruz kalan KYB karışımlarının büzülme davranışına KBE katkıyla benzer etki göstermiştir. Yazarlar, HAL'nin KYB karışımlarının erken yaş kuruma-büzülmesini ve

çatlama riskini azalttığından kaynaklandığını öne sürmüştür.

Zhang [17] yaptığı çalışmalarda, genleştirilmiş kil agregası kullanılan bir tür hafif betonun kuru kür koşullarında ilk 6 aylık rötresinin normal betonunkinden daha az 1 yıllık rötresinin ise daha fazla olduğu sonucuna varmıştır.

Yoo [18] ve arkadaşları yaptığı bir çalışmada, ard-germeli yüksek dayanımlı betonların çatlama potansiyelini KBE katkı kullanarak azaltmayı hedeflemiştir. Bu amaçla, KBE katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten çimento ağırlığının %1 ve %2'si oranında KBE katkı kullanılarak farklı beton karışımları hazırlanmıştır. Deney sonuçlarına göre, ard-germeli yüksek dayanımlı betonlarda KBE katkı kullanımı kontrol karışımına kıyasla 28 gün sonunda daha yüksek basınç ve çekme dayanımı, daha düşük büzülme gerilmesi ve gecikmiş büzülme çatlakları gösterdiği ifade edilmiştir. Yazarlar, ard-germeli yüksek dayanımlı betonlarda çalışma kapsamındaki özellikler açısından en uygun KBE katkı kullanım oranının %2 olduğunu iddia etmişlerdir.

Wang vd. [19] ile Yoo vd. [20] yaptıkları çalışmalarda, büzülme engelleyici katkı kullanımının hem normal hem de yüksek dayanımlı lifli betonların mekanik özellikleri (basınç, çekme ve eğilme dayanımı) üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yoo vd. katkı kullanımının betonların basınç, çekme ve eğilme dayanımlarını azalttığını tespit ederken, Wang vd. ise katkı kullanımının betonların basınç ve eğilme dayanımlarını arttırdığını ifade etmişlerdir.

Gagné [21] benzer diğer bir çalışmada, çimentolu sistemlerin otojen büzülmesini incelemiştir. Bu amaçla, ürettiği karışımlarda hamur fazı hacmini arttıran Cao bazlı genleştirici bir etken kullanmıştır. Yazarlar, söz konusu yöntemi kullanarak karışımlarda otojen büzülmenin azaldığını beyan etmiştir.

Hafif agregalı nem durumunun beton karışımlarının kuruma büzülmesine etkisi Mardani [22] ve arkadaşları tarafından incelenmiştir. Bu amaçla, tamamen kuru, hava kurusu ve suya doymuş yüzey olmak üzere 3 farklı nem durumuna sahip hafif pomza agregası kullanarak beton karışımları hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda çökme ve yayılma değeri sabit tutulmuştur. Yazarlar, agreganın kuru doymuş yüzey kullanılması durumunda beton karışımlarının kuruma büzülmesinin azalmasına neden olduğunu ifade etmiştir. Söz konusu bu

olumlu etkinin kuru doymuş yüzey agregaların içsel kütleleme görevi yaptığından dolayı olduğunu açıklamıştır. Benzer sonuçlar Aitcin [23] tarafından da iddia edilmiştir.

Günümüzde mevcut olan birçok farklı markaya ait değişik KBE katkılarından su azaltıcı katkı ile uyum gösteren, kuruma büzülme ve mekanik özellikleri olumlu etkileyen KBE katkının belirlenmesi çok önemli bir husustur. Bilindiği gibi çimento-katkı uyumsuzluğuna sebebiyet veren ya da kuruma büzülmede pek verim alınmayan birçok KBE katkı da mevcuttur. Bu çalışmada, 4 farklı fabrika ürünü olan toz ve sıvı halinde olmak üzere 9 adet ticari KBE katkının, harç karışımlarının kuruma büzülmesine, su emmesine ve dayanımına etkisi ve kullanılan su azaltıcı katkı ile uyumu araştırılmıştır. Bu kapsamda, tüm harç karışımlarında, S/Ç oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma miktarı sırasıyla, 0.485, 2.75 ve 230±20 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerlerini sağlamak için tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Üretilen tüm harçların basınç dayanımları, yayılma ve su emme miktarları belirlenmiş olup, kuruma-büzülme değerlerindeki değişimler incelenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada, bağlayıcı olarak TS EN 197-1 [24] standardına uygun CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu, agregalı olarak TS EN 196-1 [25] standardına uygun standart kum kullanılmıştır. Üretici firma tarafından temin edilen çimentonun kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Agreganın özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi, TS EN 1097-6 [26] standardına uygun sırasıyla, 2.72 ve %0.7 olarak elde edilmiştir. Standart kumun tane boyu dağılımı Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun Kimyasal Bileşimi, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri (Chemical Compound, Physical and Mechanical Properties Of Cement)

Oksit (%)	Çimento	Fiziksel özellikleri	
SiO ₂	18.86	Özgül ağırlık	3.15
Al ₂ O ₃	5.71	Mekanik özellikleri	
Fe ₂ O ₃	3.09	1-günlük	14.7
CaO	62.70	Basınç dayanımı (MPa)	2-günlük 26.80
MgO	1.16	7-dünlük	49.80
SO ₃	2.39	28-günlük	58.5
Na ₂ O+0.658 K ₂ O	0.92	İncelik	
Cl ⁻	0.01	Özgül yüzey (Blaine, cm ² /g)	3530
Çözünmeyen kalıntı	0.32	0.045 mm elekta kalıntı (%)	7.6
Kızdırma kaybı	3.20		
Serbest CaO	1.26		

KBE katkıların harç karışımlarının özelliklerine etkisini incelemek amacı ile 4 farklı firmanın ticari ürünü olan toplamda 9 adet KBE katkı temin edilmiştir. KBE katkı içeren karışımlarda, KBE katkı kullanım oranı çimento ağırlığının %2'si olarak sabit tutulmuştur. Böylece KBE katkılı ve katkısız toplamda 10 seri harç karışımı üretilmiştir.

Tablo 2. Standart Kumun Tane Boyu Dağılımı (Grain Size Distribution of Standart Sand)

Kare Göz Açıklığı	Kalan (%)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2.00	0	0
1.60	4.32	7±5
1.00	33.98	33±5
0.50	67.11	67±5
0.16	86.85	87±5
0.08	99.83	99±5

Harç karışımları, ASTM C109 [27] standardına uygun olacak şekilde hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda S/Ç oranı, kum/çimento oranı ve yayılma değeri sırasıyla, 0.485, 2.75 ve 230±20 mm olarak sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerini sağlamak için üretici firma tarafından temin edilen, tek tip polikarboksilat-eter esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanılmıştır. Harç karışımları homojen olarak Hobart mikserinde

hazırlanmıştır. Harç karışımı üretiminde kullanılan malzeme miktarı Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Harç Karışımlarının Üretimde Kullanılan Malzeme Oranı ve Yayılma Değeri (Material Rate and Flow Value of Mortar Mixture)

Numune Adı	Çimento	Su	Kum	KBE Katkı	SA*	Yayılma (cm)
Kontrol	1	0.485	2.7	0	0.003	23
A	1	0.485	2.7	0.02	0.003	24
B	1	0.485	2.7	0.02	0.003	23
C	1	0.485	2.7	0.02	0	23
D	1	0.485	2.7	0.02	0.004	24
E	1	0.485	2.7	0.02	0.004	22
F	1	0.485	2.7	0.02	0.001	23
G	1	0.485	2.7	0.02	0.002	23
H	1	0.485	2.7	0.02	0.002	22
I	1	0.485	2.7	0.02	0.002	24

*SA; su azaltıcı katkı

Harç karışımlarının yayılma değerleri ASTM C1437 [28] standardına uygun olacak şekilde ölçülmüştür. Söz konusu karışımların 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C109 [27] standardına göre belirlenmiştir. Ayrıca üretilen harç karışımlarının 28 günlük su emme oranları ASTM C642-97 [29] standardına uygun olarak elde edilmiştir. Temin edilen katkılardan, D-E-F ile adlandırılan katkılar toz halinde diğerleri ise sıvı halindedir. Bunlara ilaveten karışımların kuruma-büzülme davranışlarını incelemek amacı ile her seri için üçer adet 25x25x285 mm prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 48 saat boyunca sıcaklığı 20°C suda kürlenmiştir. Daha sonra kür havuzundan çıkarılıp sıcaklığı 20°C ve bağıl nemi %55 olan bir odada bekletilmiştir. Bu ortamda prizmatik numunelerin boy değişimi Denklem 1' de gösterildiği gibi ASTM C 596-01 [30]'e göre hesaplanmıştır.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada, S numunenin büzülme yüzdesini, L₁ kür havuzundan çıkarıldıktan sonra başlangıç ölçüm değerini, L geçen günlere göre periyodik ölçüm değerini, L₀ efektif ölçüm boyunu ifade etmektedir. Harç karışımlarının kuruma büzülme ölçümüne ait görsel Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Harç karışımlarının kuruma-büzülme ölçümü (Drying-shrinkage measurement of mortar mixture)

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME (TEST RESULTS AND EVALUATION)

3.1. Taze Hal Özellikleri (Fresh State Properties)

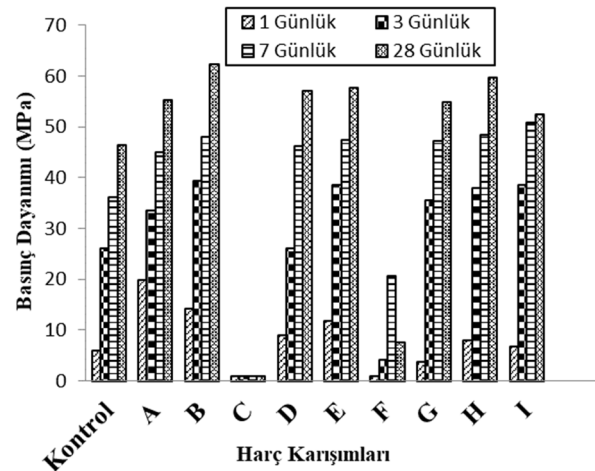
3.1.1. Yayılma Değeri (Flow Value)

Harç karışımlarının yayılma miktarları Tablo 3'te verilmiştir. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi tüm harç karışımlarında yayılma değeri 230 ± 20 mm olarak sabit tutulmuştur. KBE katkı içermeyen kontrol karışımında hedef yayılma değerini sağlamak için çimento ağırlığının %0.3'ü kadar su azaltıcı katkı kullanılmıştır. A ve B karışımlarında da söz konusu yayılma değerini sağlamak için aynı miktarda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. G, H ve I karışımlarında söz konusu su azaltıcı katkı miktarı %0.1 olmuştur. D ve E karışımlarında bu değer kontrol karışımının daha üstünde bir değer olarak (%0.4) tespit edilmiştir. Ancak, C ve F karışımlarında hedef yayılmayı sağlamak için su azaltıcı katkı gereksinimi azalmıştır. Hatta C karışımında su azaltıcı katkı kullanılmadan 230 mm yayılma değeri gözlemlenmiştir. Söz konusu C ve F katkıları, üretici firma beyanına göre hava sürüklemek suretiyle karışımların boşluk yapısını değiştirerek kuruma-büzülme davranışını olumlu etkilemektedir. Söz konusu bu KBE katkıları kullanarak karışımların işlenebilirliğinin olumlu etkilenmesi bu katkıların hava sürüklemeye özelliğine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak, bahsi geçen C ve F karışımları su azaltıcı katkı içermemesine veya

çok az miktarda su azaltıcı katkı içermesine rağmen sırasıyla 7 ve 3 gün boyunca priz almamıştır. Söz konusu karışımlarda kullanılan KBE katkı-çimento arasında bir uyumsuzluk oluşumu tespit edilmiştir. D, E ve F katkıları karışıma toz halinde eklenmiştir. D ve E karışımlarında istenilen yayılma değerini sağlamak için katkı gereksinimi kontrol karışımına kıyasla artış göstermiştir.

3.2. Basınç Dayanımı (Compressive Strength)

Harç karışımlarının basınç dayanımı sonuçları Şekil 2'de özetlenmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalamasını ifade etmektedir. KBE katkı kullanımından bağımsız olarak harç karışımlarının basınç dayanımı zamanla artmıştır. KBE katkı kullanımı ile harç karışımlarının hem erken hem de ileri yaş dayanımları genel olarak olumlu etkilenmiştir. Bu çalışma kapsamında kullanılan KBE katkı, üretici firma beyanına göre düşük viskozite özelliği sayesinde yüzey gerilmelerini azaltarak mikro çatlak oluşumunun azalmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple de karışımların dayanımının artmasına neden olmuştur. Ancak, C ve F karışımları sırasıyla 7 ve 3 gün boyunca priz almadıkları için karışımların dayanım değeri ölçülemez. F karışımı ise diğer karışımların çok daha altında bir dayanım göstermiştir. Toz halinde olan D ve E KBE katkıları içeren karışımlar erken yaş dayanımlarında kontrol karışımının altında ancak 28 gün sonunda dayanım açısından kontrol karışımına benzer bir davranış göstermiştir.

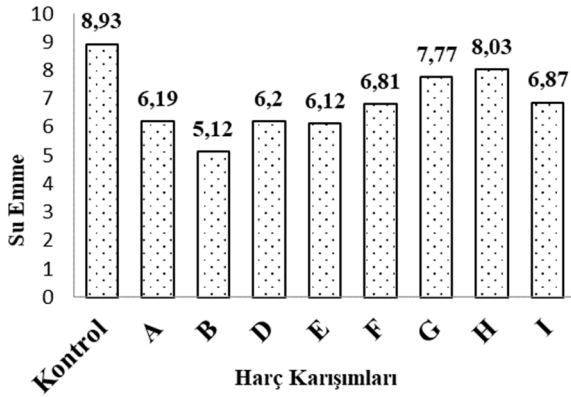


Şekil 2. Harç Karışımlarının Basınç Dayanımları (MPa) (Compressive Strength of Mortar Mixture)

3.3. Su Emme (Water Absorption)

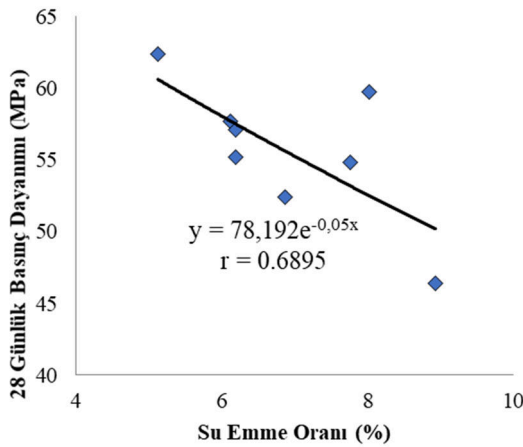
Harç karışımlarının 28 günlük su emme oranı Şekil 3'te gösterilmektedir. Her değer 3 ölçümün

ortalamasını ifade etmektedir. C karışımı priz almadığından su emme ölçümleri alınamamıştır. Sonuçlardan da görüldüğü gibi, KBE katkı kullanımı ile harç karışımlarının su emme oranı kontrol karışımına göre azaltmıştır. En düşük su emme oranı B karışımında gözlemlenmiştir. Söz konusu karışımın geçirgenliği kontrol karışımına kıyasla %43 daha az olmuştur. Bu karışım basınç dayanımı açısından da en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir. KBE katkı kullanımı ile karışımların geçirgenliğinin azalması, yüzey gerilmelerinin azalması sonucu mikro çatlak oluşumunun daha az olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 3. Harç Karışımlarının Su Emme Oranı (Water Absorption of Mortar Mixture)

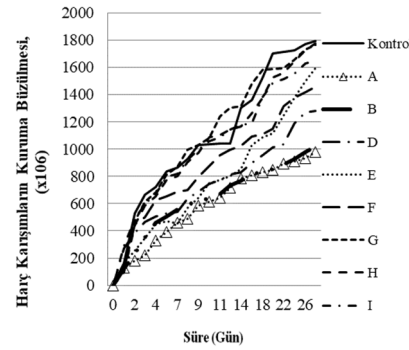
Harç karışımlarının 28 günlük basınç dayanımı ve su emme ilişkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Karışımların basınç dayanımı ve su emme oranı arasında zayıf bir üstel ilişkinin mevcut olduğu Şekil 4'den de anlaşılmaktadır.



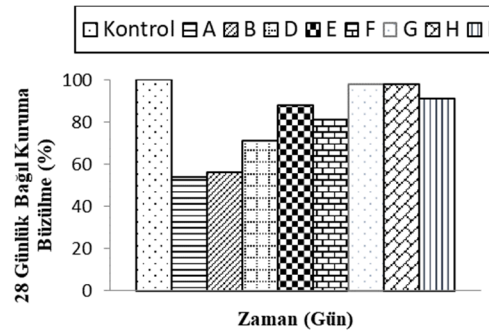
Şekil 4. Harç Karışımlarının 28 Günlük Basınç Dayanımı ve Su Emme Oranı Arasındaki İlişki (Relation Between 28-day Compressive Strength and Water Absorption Capacity of Mortar Mixture)

3.4 Kuruma-Büzülme (Drying-Shrinkage)

Harç karışımlarının kuruma-büzülme ölçüm sonuçları ve bağıl büzülme değerleri sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Her değer 3 ölçüm ortalamasını ifade etmektedir. C karışımı 7 gün boyunca priz almadığı için kuruma-büzülme ölçümleri alınamamıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, KBE katkı kullanımından bağımsız olarak karışımların ilk günlerde büzülme artışı şiddeti yüksek iken zamanla büzülme artışı şiddeti azalmıştır. KBE katkı kullanımı ile harç karışımlarının büzülme değerleri kontrol karışımının altında bir değer olmuştur. Ancak G, H ve I karışımları büzülme davranışı açısından kontrol karışımına benzer bir davranış göstererek başarısız bir sonuç ortaya koymuştur. Bilindiği gibi, çimentolu sistemlerde su kaybı sonucu büzülme olayı ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla karışım geçirgenliği büzülme davranışını ciddi mertebede etkilemektedir. Tüm karışımlar arasında en düşük su emme oranına sahip olan B karışımının kuruma-büzülme davranışı açısından diğer karışımlara kıyasla, en başarılı karışım olduğu deney sonuçlarından da görülmektedir. 28 gün sonunda söz konusu karışımın büzülme miktarı kontrol karışımına kıyasla %43 daha az olmuştur.

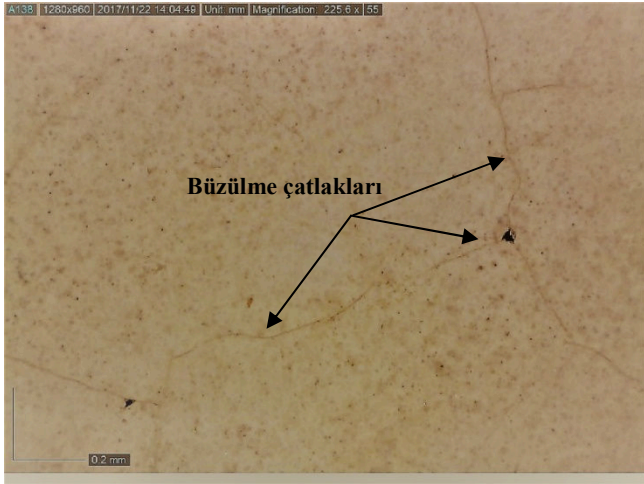


Şekil 5. Harç Karışımlarının Kuruma Büzülme Değerleri (Drying-Shrinkage Values of Mortar Mixture)

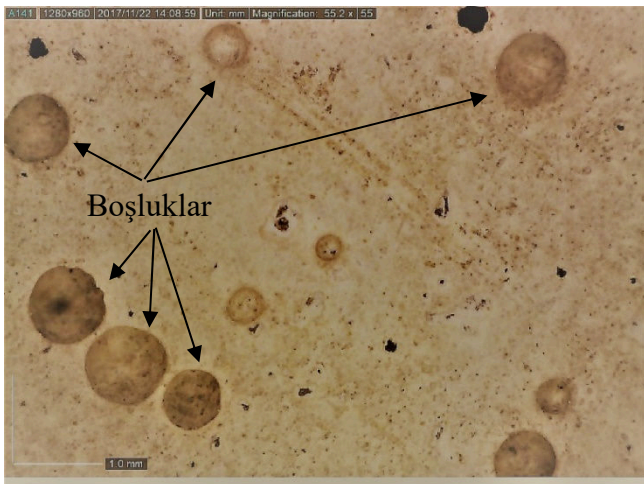


Şekil 6. Harç Karışımlarının 28 Günlük Bağıl Kuruma Büzülme Değerleri (28-day Relative Drying-Shrinkage Values of Mortar Mixture)

Bunlara ilaveten, harç karışımlarında kuruma-büzülme döngü sonrası çatlak oluşumu, mikroyapı analizi gerçekleştirilerek gözlemlenmiştir. KBE katkı içeren harç karışımlarının yüzeyinde herhangi bir çatlak oluşumu gözlemlenmemiştir. Burada, kuruma-büzülme davranışı açısından en iyi performansı gösteren A karışımına ait mikroskopik görüntü Şekil 7'de gösterilmiştir. KBE katkı içermeyen kontrol karışımının mikroskopik görüntüsü Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere, kuruma-büzülme döngü sonrası numune yüzeyinde büzülme çatlakları oluşmuştur.

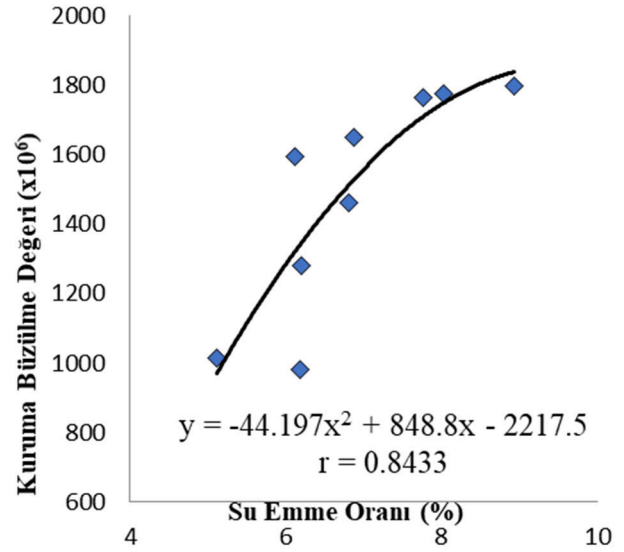


Şekil 7. KBE katkı içeren A karışımının mikroskopik görüntüsü (Microscopic image of A mixture containing SRA)



Şekil 8. KBE katkı içermeyen kontrol karışımının mikroskopik görüntüsü (Microscopic image of control mixture containing no SRA)

Harç karışımlarının su emme oranı ve 28 gün sonundaki büzülme değerleri arasındaki ilişki Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi harç karışımlarının su emme ve büzülme değerleri arasında nispeten kuvvetli polinomsal bir ilişki mevcuttur.



Şekil 9. Harç Karışımlarının 28 Günlük Kuruma Büzülme Değerleri ve Su Emme Oranı Arasındaki İlişki (Relation Between 28-day Drying-Shrinkage Value and Water Absorption Capacity of Mortar Mixture)

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Dokuz farklı ticari büzülme engelleyici katkının, harç karışımlarının taze hal özelliklerine, kuruma-büzülmesine, basınç dayanımına etkisinin incelendiği bu çalışmada yapılan deney sonuçlarına dayanarak aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Büzülme engelleyici katkı kullanımıyla harç karışımlarının taze hal özellikleri olumlu etkilenmiştir. Ancak, biri toz biri sıvı olmak üzere 2 adet kuruma büzülme engelleyici katkı kullanımı harç karışımlarının priz almamasına neden olmuştur. Söz konusu uyumsuz bu iki katkı harç karışımlarında hedef yayılma değerini sağlamak için su azaltıcı katkı gereksinimini azaltmıştır.

Büzülme engelleyici katkı kullanımı sonucu harç karışımlarının basınç dayanımı ve geçirgenlik özelliği genel olarak olumlu etkilenmiştir.

Kuruma-büzülme engelleyici katkı kullanımı ile harç karışımlarının büzülme değerleri kontrol karışımının altında bir değer olarak ölçülmüştür. Kontrol karışımına kıyasla büzülme açısından etkili olan KBE katkı harç karışımlarının büzülme miktarında %45'lik bir düşüşe, en verimsiz KBE katkı ise %10'luk bir düşüşe sebebiyet vermiştir.

Bu çalışmadan elde edilen veriler doğrultusunda, karışımların su emme ve büzülme değerleri arasında nispeten kuvvetli polinomsal bir ilişkinin mevcut olduğu ancak su emme oranı ve dayanım değerleri arasında ise zayıf bir üstel ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.

Çalışmada kullanılan 9 adet KBE katkı içinde, sıvı halinde olan KBE katkıları, toz olan katkılarından daha başarılı olmuştur.

5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar, standart kum ve çimento temini için Bursa Beton A.Ş.'ne, su azaltıcı katkı ve büzülme engelleyici katkı temini için Polisan A.Ş.'ne ve büzülme engelleyici katkı temini için BASF'ye teşekkür ederler.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] D.P., Bentz, M.R., Geiker, K.K., Hansen, "Shrinkage-Reducing Admixtures and Early-Age Desiccation in Cement Pastes and Mortars", *Cement and Concrete Research*, No. 31, pp. 1075-1085, 2001.
- [2] B. Baradan, H. Yazıcı ve H. Ün, *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık*, 1st ed. Türkiye Hazır Beton Birliği, 2010.
- [3] P.K., Mehta, P.J.M., Monteiro "Concrete: Microstructure, Properties and Materials", 3th ed., McGraw-Hill, 2006.
- [4] J., Saliba, E., Roziere, F., Grondin, A., Loukili, "Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on Plastic and Long-Term Shrinkage", *Cement and Concrete Composites*, No. 33, pp. 209-217, 2011.
- [5] K. J. Folliard and N. S. Berke, "Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture," *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 9, pp. 1357-1364, 1997.
- [6] T. Kadioğlu, "Rötre Azaltıcı Katkı Maddeleri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [7] Gu, Y., Wei, Z., Ran, Q., Shu, X., Lv, K., & Liu, J., "Characterizing cement paste containing SRA modified nanoSiO₂ and evaluating its strength development and shrinkage behavior", *Cement and Concrete Composites*, 75, 30-37, 2017.
- [8] R., Bloom, and A., Bentur, 1992, Free and restrained shrinkage of normal and high strength concretes, *ACI Materials Journal*, 92, 211-217.
- [9] Wehbe, Y., Ghahremaninezhad, A., "Combined effect of shrinkage reducing admixtures (SRA) and superabsorbent polymers (SAP) on the autogenous shrinkage, hydration and properties of cementitious materials", *Construction and Building Materials*, 138, 151-162, 2017.
- [10] M., Lopez, L.F., Kahn, K.E., Kurtis, 2004, Creep and shrinkage of high-performance lightweight concrete, *ACI Materials Journal*, 101, 391-399.
- [11] Zuo, W., Feng, P., Zhong, P., Tian, Q., Gao, N., Wang, Y., ... & Miao, C., "Effects of novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes", *Cement and Concrete Research*, 100, 413-422, 2017.
- [12] J.M., Ruacho, R., Gettu, A., Aguado, "Influence of Shrinkage-Reducing Admixtures on the Reduction of Plastic Shrinkage Cracking in Concrete", *Cement and Concrete Research*, No. 39, pp. 141-146, 2009.
- [13] Deboodt, T., Fu, T., & Ideker, J. H., "Evaluation of FLWA and SRAs on autogenous deformation and long-term drying shrinkage of high performance concrete", *Construction and Building Materials*, 119, 53-60, 2016.
- [14] B., Rongbing, and S., Jian, "Synthesis and Evaluation of Shrinkage-Reducing Admixture for Cementitious Materials", *Cement and Concrete Research*, No. 35, pp.445-448, 2005.
- [15] N., Quangphu, J., Linhua, L., Jiaping, T., Qian, D., Tienquan, "Influence of Shrinkage-Reducing Admixture on Drying Shrinkage and mechanical Properties of High-Performance Concrete", *Water Science and Engineering*, No. 1, pp. 67-74, 2008.
- [16] Tioua, T., Kriker, A., Barluenga, G., & Palomar, I., "Influence of date palm fiber and shrinkage reducing admixture on self-compacting concrete performance at early age in hot-dry environment" *Construction and Building Materials*, 154, 721-733, 2017.
- [17] M-H., Zhang, L., Li, P., Paramasivam, 2005, "Shrinkage of high-strength lightweight aggregate concrete exposed to dry environment", *ACI Materials Journal*, 102, 86- 92.

- [18] Yoo, D. Y., Ryu, G. S., Yuan, T., & Koh, K. T. "Mitigating shrinkage cracking in posttensioning grout using shrinkage-reducing admixture", *Cement and Concrete Composites*, 81, 97-108, 2017.
- [19] J.Y., Wang, N., Banthia, M.H., Zhang, "Effect of Shrinkage Reducing Admixture on Flexural Behaviors of Fiber Reinforced Cementitious Composites", *Cement and Concrete Composites*, No. 34, pp. 443-450, 2012.
- [20] D.Y., Yoo, A.T., Kang, J.H., Lee, Y.S., Yoon, "Effect of Shrinkage Reducing Admixture on Tensile and Flexural Behaviors of UHPFRC Considering Fiber Distribution Characteristics", *Cement and Concrete Research*, No. 54, pp. 180-190, 2013.
- [21] R., Gagne, *Science and Technology of Concrete Admixtures*, Chapter 22, 2016.
- [22] A., Mardani, E., Yoğurtçu, Ö., Andiç, "Water Transport of Lightweight Concrete with Different Aggregate Saturation Levels", *ACI Materials Journal*, 112, 681-692.
- [23] P.C., Aitcin, *High Performance Concrete*, E&FN SPON, New York, 2004.
- [24] TS EN 197-1, Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, *TSE*, Ankara, 2012.
- [25] TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun Ve Su Emme Oranının Tayini, *TSE*, Ankara, 2013.
- [26] TS EN 196-1, Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini, *TSE*, Ankara, 2016.
- [27] C1437-15, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017.
- [28] ASTM C642-97, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, , *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017.
- [29] ASTM C596-01, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, , *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017.
- [30] ASTM C109-16, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 09-10-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 21-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.342521	

Polipropilen lif kullanımının doğal hidrolik kireçli harçların kuruma büzülmesine etkisi

Muhammet Gökhan Altun¹, Süleyman Özen², Ali Mardamı-Aghabaglou^{*2}

ÖZ

Tarihi eserlerin restorasyonu ve rekonstrüksiyonunda aslına uygun malzemelere yakın malzemelerin kullanılması büyük önem arz etmektedir. Ahşap, kerpiç, tuğla, taş ve harç gibi malzemeler tarihi yapıların onarımında kullanılan malzemelerdir. Horasan harcı bu amaçla kullanılan en önemli malzemelerden birisidir. Horasan Harcı öğütülmüş kiremit ve hidrolik kireç karışımından oluşmaktadır. Beton ve harç karışımlarına benzer şekilde büzülme çatlaklarının oluşması, hidrolik kireçli karışımlarda da dayanım ve dayanıklılık problemlerine neden olmaktadır. Bu çalışmada, polipropilen lif kullanımının hidrolik kireçli harçların basınç ve eğilme dayanımına, su emme kapasitesine ve kuruma büzülme davranışına etkisi incelenmiştir. Bu bağlamda bağlayıcı olarak doğal hidrolik kireç, agrega olarak kırma taş kireç agregası içeren lifli ve liffsiz olmak üzere 3 farklı seri harç karışımları hazırlanmıştır. Dayanım özellikleri ve kuruma büzülme davranışlarını iyileştirmek amacı ile harç karışımlarına toplam hacmin %0,5 ve %1,0'i oranlarında polipropilen lif ilave edilmiştir. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı, kum/bağlayıcı ve yayılma değerleri sırasıyla 0,6, 2,75 ve 150±10 mm olarak sabit tutulmuştur. Bilindiği gibi lif kullanımı ile harç karışımlarının işlenebilirliği olumsuz etkilenmektedir. Bu sebeple lifli karışımlarda 150±10 mm yayılma değerini sağlamak için lif içermeyen karışıma kıyasla daha fazla su eklenmesi gerekmektedir. Ancak dayanım azalmasını engellemek amacıyla lifli ve lif içermeyen karışımlarda su miktarları sabit tutulmuştur. 150±10 mm hedef yayılma değerini sağlamak için ilaveten değişik oranlarda polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Üretilen harç karışımların 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımları, 28 günlük su emme ve kuruma-büzülme değerleri belirlenmiştir. Sonuçlara göre lif kullanımı ile istenilen yayılma değerini sağlamak için su azaltıcı katkı gereksinimi artmıştır. Dayanım, su emme ve büzülme değerlerinde ciddi mertebelerde iyileşme olmamıştır.

Anahtar Kelimeler: Hidrolik kireç, Kuruma büzülme, Mekanik özellikler, Polipropilen lif

¹ Bursa Büyükşehir Belediyesi

² Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

The effect of using polypropylene fiber on drying shrinkage of natural hydraulic lime mortars

ABSTRACT

It is important to use the proper materials in accordance with the original in the restoration and reconstruction of the historical buildings. The timber, mud-brick, brick, stone and mortar are the materials used in historical buildings. The Horasan mortar is one of the most important materials used for repairing of historical buildings. The Horasan mortar consists of grinded building-tile and hydraulic lime. Similar to the concrete and mortar mixtures formation of shrinkage cracks cause the strength and durability problems in hydraulic lime mixture. In this study, the effect of polypropylene fibre utilization on compressive, flexural strength and water absorption capacity as well as drying shrinkage of hydraulic lime mortar was investigated. For this aim, three series mortar mixtures containing natural hydraulic lime as binder and crushed limestone aggregate were prepared in the absence and presence of polypropylene fibre. Polypropylene fibre was added as 0.5% and 1.0% of total volume into the mortar mixtures in order to improve strength properties and drying shrinkage behaviour. In the all mortar mixtures, water/binder, sand/binder ratios and flow values were kept constant as 0.6, 2.75 and 150 ± 10 mm, respectively. As it is known, the workability of mortar mixtures is adversely affected by using fibre. For this reason, more amount of water should be added to the fibre-containing mortar compared to the fibre-free mortar to provide flow value of 150 ± 10 mm. However, in order to prevent the decrease in strength, the amount of water was kept constant in both fibre and non-fibre mortar mixtures. A polycarboxylate based water reducing admixture was additionally used at different ratios to provide a target flow value of 150 ± 10 mm. 1, 3, 7, 28-day compressive and flexural strengths, 28-day water absorption capacity as well as 28-day drying-shrinkage behaviour of mortar mixture were measured. According to the test results, water reducing admixture requirement for providing of desired flow value was increased and strengths, water absorption as well as drying-shrinkage of mortar mixture were not significantly improved by addition of fiber.

Keywords: Hydraulic lime, Drying shrinkage, Mechanical properties, Polypropylene fiber

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Geçmişte yapılarda en çok tercih edilen bağlayıcı malzeme olan kireç, portland çimentosunun keşfi ile yaygınlığını kaybetmiştir [1-3]. Portland çimentosu, özellikle son yüzyıldan günümüze kadar beton ve harç sistemlerinde en çok kullanılan bağlayıcı malzeme olmasına karşın, çimentolu sistemlerin neden olduğu bazı uyuşmazlıklardan (çiçeklenme, düşük su buharı geçirirliiği, yüksek genleşme katsayısı vb.) dolayı tarihi yapıların restorasyonu ve rekonstrüksiyonunda hidrolik kireçli sistemlerin kullanılması tavsiye edilmektedir [4,5].

Hidrolik kirecin uygulama alanlarından biri, geçmişte Yunanistan, Anadolu, Filistin, İran gibi bölgelerde de kullanımı çok yaygın yapı malzemesi olan Horasan Harcıdır. Horasan Harcı öğütülmüş kiremit, kireç, su ve bazı katkı maddelerinin karışımından oluşmaktadır. Günümüzde hidrolik kireç esaslı bu harçların geliştirilmesine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır [6-8]. Söz konusu harçların geliştirilmesinde genellikle mineral katkılar [2, 9, 10] ile organik maddeler [8, 11, 12] kullanılmakta olup, kimyasal katkı içeren çalışmalar [3, 13, 14, 15] da mevcuttur. Buna ilaveten çekme dayanımı, eğilme dayanımı, tokluk gibi bazı mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amacıyla çeşitli liflerin hidrolik kireç esaslı harçlara ilave edildiği çalışmalar da bulunmaktadır [4, 5, 16]. Konu ile ilgili bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Seabra ve arkadaşları [15] tarafından yapılan çalışmada, taze hidrolik kireç esaslı harçların reolojik özellikleri araştırılmıştır. İki aşamada gerçekleştirilen deneysel çalışmanın birinci aşamasında harçların rölatif akma gerilmesi ve rölatif plastik viskozite parametreleri tespit edilmiş ve çökme ölçümleri yapılarak reolojik verilerin korelasyon ilişkileri belirlenmiştir. İkinci aşamada ise süperakışkanlaştırıcı kullanımının hidrolik kireçli harçların reolojik davranışları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Sonuç olarak süperakışkanlaştırıcı kullanımı ile harçların tork ve çökme değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir.

Izaguirre ve arkadaşları [5] yaptıkları çalışmada, kireç esaslı harç karışımlarına polipropilen lif ilave ederek harçları performans bakımından incelemiştirlerdir. Üretilen kireçlerin taze hal davranışları, hava içeriği, priz süresi, yoğunluk, kuruma-büzülme, su emme, su buharı geçirgenliği,

uzun süreli basınç ve eğilme dayanımları, boşluk yapısı ve donma-çözülme direnci gibi farklı özelliklerini araştırmışlardır. Karışımlarda lif miktarını harç ağırlığının %0,5 ve %0,06'sı olacak şekilde kullanmışlardır. %0,06 oranında lif içeren harç karışımlarında daha düşük su buharı geçirgenliği ve yüksek dayanım elde etmişlerdir. Ayrıca kuruma-büzülmeden dolayı oluşan çatlakların sayısı kontrol karışımına kıyasla daha az görülmüş ve donma çözülme performansında artışlar meydana gelmiştir. %0,5 oranında lif içeren harç karışımlarında donma-çözülme çatlakları oldukça azalmıştır. Ancak harç karışımlarında gerekli işlenebilirliğin sağlanması için su ihtiyacı artmıştır. Bu bağlamda harç karışımların mekanik özellikleri olumsuz etkilenmiştir.

Erdoğdu ve arkadaşları [17] tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül ve polipropilen lif katkılı kireç harçlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve kılcal su emme davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bağlamda kireç yerine %50 oranında uçucu kül kullanılmış olup, 3 ve 6 mm olmak üzere iki çeşit polipropilen lif %1,0 ve %1,5 oranlarında ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre lif kullanımı harçların basınç dayanımlarını az miktarda, eğilme dayanımlarını ise önemli ölçüde arttırmıştır. Ayrıca lif kullanım oranının artışına bağlı olarak kılcallık katsayılarının arttığı gözlemlenmiştir.

Barr ve arkadaşları [18] yaptıkları çalışmada, doğal hidrolik kireç ve doğal çimento harçlı yığıma yapıların bağ dayanımları üzerine araştırmada bulunmuşlardır. Bu amaçla 3 farklı dayanıma sahip hidrolik kireç ile çimento harçlı bağlayıcılar kullanılarak yapılan yığıma blokların eğilme bağ dayanımları bağ burkulma testleri ile ölçmşlerdir. Deneysel sonuçlarında tüm harç karışımlarında eğilme deneyinde göçme bölgesine kadar şekil değiştirmeler lineer olarak artmıştır. Harcın rijitliği hidrolik bağlayıcının artmasıyla artmıştır. Hidrolik kireç ve çimentolu harç sistemlerinin 28 günlük bağ dayanımları karşılaştırıldığında hidrolik kireçli harçların bağ dayanımlarının daha düşük olduğunu tespit etmişlerdir. Bloklar arasında ön ıslatma yapılması bağ dayanımlarında önemli etkilere sebep olmuştur. Ön ıslatma yapılan kısımlarda bağ dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir.

Betonlarda sıkça rastlanan ve betonun kalıcılığını doğrudan etkileyen çatlaklar çeşitli nedenlerden kaynaklanmaktadır. Çatlak oluşumunun önemli sebeplerinden biri kuruma büzülmesidir. Kuruma

büzülmesi sonucu meydana gelen çatlakların önüne geçilmesi betonun faydalı kullanım ömrü açısından büyük önem arz etmekte ve bu konu ile ilgili birçok yöntem bulunmaktadır. Su/çimento oranının azaltılması, lif ilavesi, mineral ve kuruma büzülme engelleyici katkıların kullanılması bu yöntemler arasındadır. Büzülme çatlaklarının oluşması çimentolu sistemlerde olduğu gibi hidrolik kireçli karışımlarda da dayanım ve dayanıklılık problemlerine neden olmakta ve polipropilen lif kullanılarak bu çatlakların oluşması nispeten engellenebilmektedir [19, 20, 21].

Bu çalışmada polipropilen lif kullanımının hidrolik kireçli harçların basınç ve eğilme dayanımı, kuruma büzülmesi ve su emmesine etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda toplam hacmin %0,5 ve %1,0'i oranlarında polipropilen lifli ve lifsiz olmak üzere 3 farklı seri harç karışımları hazırlanmıştır. Karışımlarda kum/bağlayıcı oranı ve yayılma miktarı sırasıyla 2,75 ve 150±10 mm olacak şekilde sabit tutulmuştur. İstenen yayılma miktarları su azaltıcı katkı kullanılarak sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir.

2. DENEYSSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

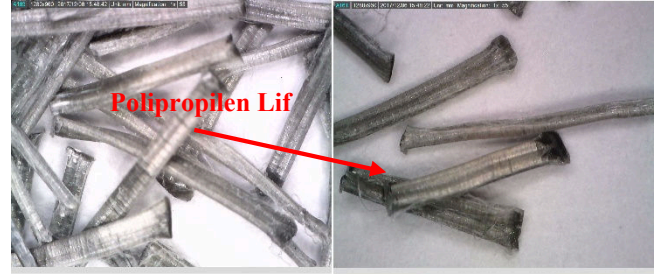
Bu çalışmada bağlayıcı olarak tarihi yapılar için hazırlanmış çimento içermeyen ve üretici firmanın beyanına göre özgül ağırlığı 2,0 olan doğal hidrolik kireç kullanılmıştır. Agrega olarak ise kırma kireçtaşı kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumun özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi, TS EN 1097-6 [22] standardına göre sırasıyla 2,68 ve %1,0 olarak tespit edilmiştir. Kumun tane büyüklüğü dağılımı Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Kumun tane büyüklüğü dağılımı (Sand grain size distribution)

Kare Göz Açıklığı (mm)	Geçen (%)	Kalan (%)
4,00	100	0
2,00	77,5	22,5
1,00	49,4	50,7
0,50	32,0	68,0
0,25	12,9	87,1
0,125	2,5	97,5

Lif içeren karışımlarda Şekil 1' de gösterilen 5 mm uzunluğunda olan 0,5x1,15x5 mm' lik prizma şeklinde tırtıklı polipropilen lif kullanılmıştır.

Kullanılan lifin yoğunluğu ve çekme dayanımı üretici firma tarafından sırasıyla 0,92 g/cm³ ve 400-600 N/mm² olarak tespit edilmiştir.



Şekil 1. Polipropilen lifin mikroskopik görünümü
(Microscopic images of polypropylene fiber)

Karışımların dayanım özellikleri ve büzülme davranışlarını iyileştirmek amacı ile lif içermeyen kontrol karışımına ilaveten toplam hacmin %0,5 ve %1' i oranında polipropilen lif ilavesi yapılarak 2 farklı lifli karışım daha hazırlanmıştır. Hazırlanan tüm karışımlarda su/bağlayıcı, kum/bağlayıcı oranları ve yayılma değerleri sırasıyla 0,6, 2,75 ve 150±10 mm olarak sabit tutulmuştur. Harç karışımı üretiminde kullanılan malzeme miktarları Tablo 2' de verilmektedir. Tüm harç karışımları homojen olarak hobart mikserinde hazırlanmıştır. Lif içermeyen kontrol karışımı HK, hacimce %0,5 polipropilen lifli karışım HKP0,5 ve hacimce %1,0 polipropilen lifli karışım ise HKP1,0 olarak adlandırılmıştır. Bilindiği gibi lif kullanımı ile harç karışımlarının işlenebilirliği olumsuz etkilenmektedir. Bu sebepten dolayı Tablo 2' den de görüldüğü gibi lif içeren karışımlarda 150±10 mm yayılma değerini sağlamak için lif içermeyen kontrol karışımına kıyasla daha fazla su gereksinimi olmuştur. Böyle bir durumda, karışımlarda daha fazla su kullanımıyla boşluk miktarı artacağından dolayı dayanımlar düşmektedir [23]. Söz konusu olumsuz etkiyi ortadan kaldırmak için tüm karışımlarda su miktarı sabit tutulmuştur. Hedef yayılma değerini sağlamak için karışımlara değişik oranlarda polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı ilave edilmiştir. Tablo 2' den de görüldüğü gibi lif kullanımıyla ve kullanım oranının artışıyla sabit yayılma değerini sağlamak için katkı gereksinimi artmıştır.

Tablo 2. Harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme oranı (Mass ratios of the materials used in the production of mortar mixtures)

	HK	HKP0,5	HKP1,0
Hidrolik kireç	1	1	1
Su	0,6	0,6	0,6
Kum	2,75	2,75	2,75
Su azaltıcı katkı	0,009	0,010	0,017
Polipropilen lif	0	0,0046	0,0092
Yayılma (mm)	150	143	145

Üretilen karışımlar standarda uygun olacak şekilde kalıplara yerleştirilmiştir. Daha sonra 24 saat boyunca 23°C sıcaklıkta ve nem oranı %95 olan kabinde kürlenmiştir. 24 saatin sonunda, numuneler tam priz almadıklarından dolayı 24 saat daha bekletilerek toplamda 48 saat kabinde kürlenme işlemi uygulanmıştır.

Karışımların 1, 3, 7 ve 28 günlük orta nokta yüklemeye eğilme dayanımı TS EN 196-1 [24] standardına göre 40x40x160 mm' lik prizmatik numunelerden elde edilmiştir. Karışımların 1, 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, eğilme deneyine tabi tutulan numunelerden elde edilen 40 mm küp numuneler üzerinde belirlenmiştir.

Bunlara ilaveten hidrolik kireçli harçların kuruma büzülme davranışlarını incelemek amacı ile her seri için üçer adet 25x25x285 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 48 saat sonra kalıptan çıkarılarak 72 saat boyunca 23°C sıcaklıkta ve nem oranı %95 olan kabinde kürlenmiştir. Daha sonra numuneler kabinden çıkarılıp sıcaklığı 20°C ve bağıl nemi %55 olan bir odada bekletilerek numunelerin boy değişimi 12 gün boyunca ASTM C596 [25] standardına uygun olarak Şekil 2' de gösterilen kuruma-büzülme uzunluk ölçüm cihazı kullanılarak Denklem 1' de gösterildiği gibi hesaplanmıştır.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \times 100 \quad (1)$$

Burada, S numunenin büzülme yüzdesini, L_1 kür havuzundan çıkarıldıktan sonra başlangıç ölçüm değerini, L sonraki günlerde ölçüm değerlerini, L_0 etkin ölçüm boyunu ifade etmektedir.

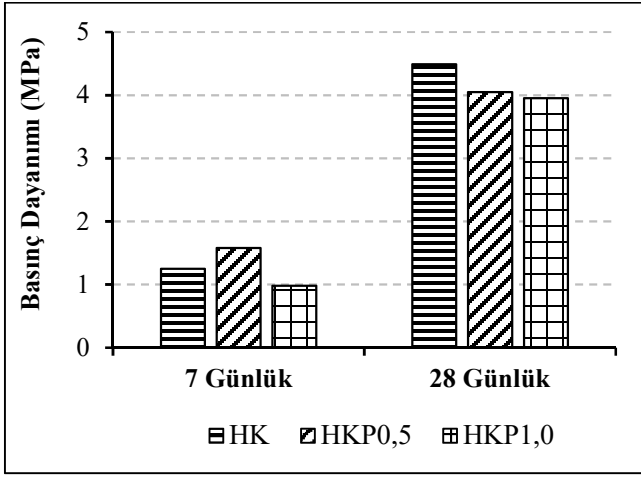


Şekil 2. Harç kuruma-büzülme boy değişimi ölçüm cihazı (Mortar drying-shrinkage length comparator)

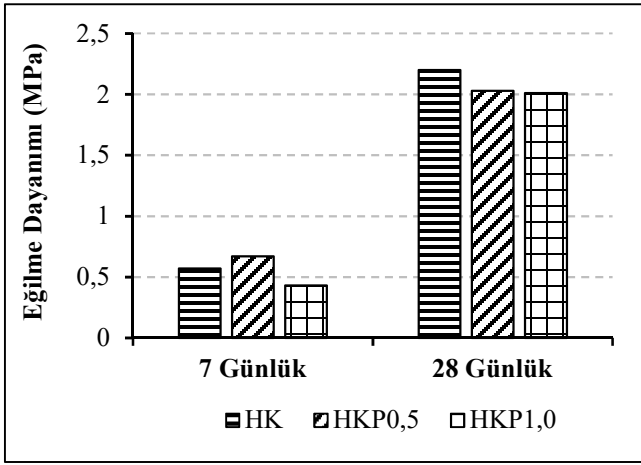
3. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRME (TEST RESULTS AND EVALUATION)

3.1. Basınç ve Eğilme Dayanımı (Compressive and Flexural Strength)

Karışımların basınç ve eğilme dayanımları sonucu sırasıyla Şekil 3 ve 4' te verilmiştir. Numuneler 48 saatin sonunda priz almadıklarından dolayı 1 günlük dayanımlar belirlenememiştir (Şekil 5a). Buna ilaveten 3 günlük numunelerin basınç ve eğilme dayanımı sıfıra yakın bir değer çıkmıştır (Şekil 5b). 7 günlük örneklere bakıldığında polipropilen lif kullanımıyla karışımların dayanımı artmıştır. Ancak, hacimce %1 oranında lif kullanıldığında hem basınç hem de eğilme dayanımında azalmalar gözlemlenmiştir. 28 günlük sonuçlar incelendiğinde lif kullanım oranından bağımsız olarak harç karışımlarının hem eğilme hem de basınç dayanımları azalmıştır. Bu etki lif kullanım oranının artışıyla daha da belirgin hale gelmiştir.



Şekil 3. Karışımların basınç dayanımı (Compressive strength of mortar mixtures)

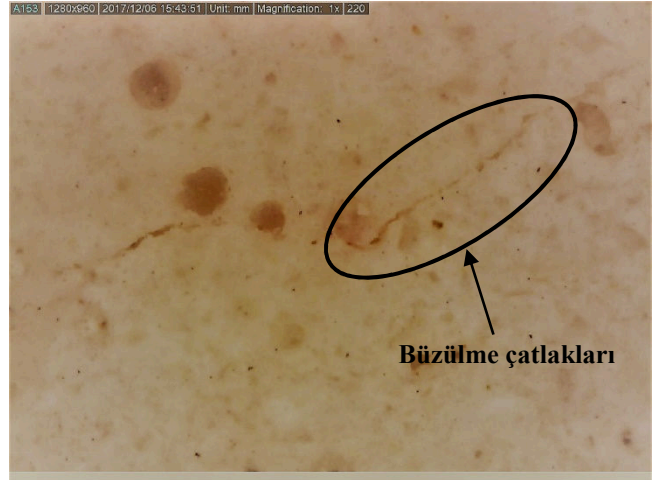


Şekil 4. Karışımların eğilme dayanımı (Flexural strength of mortar mixtures)

Literatüre göre bağlayıcı olarak kireç içeren karışımlarda su/kireç oranları genel olarak 1'in üstünde seçilmektedir [5,13]. Daha öncede vurgulandığı gibi harç karışımlarının dayanımını artırmak amacıyla su azaltıcı katkı kullanılarak karışımların su/kireç oranı önceki karışımlara kıyasla daha düşük (0,6) seçilmiştir. Böyle bir karışımda, başlangıç yayılma değeri sağlansa da aşırı su ihtiyacından dolayı Şekil 6'da da gösterildiği gibi karışımın yüzeyinde büzülme kaynaklı çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Dayanım değerlerindeki azalmanın sebebinin, oluşan çatlaklar sonucu matris ve liflerin yüklem esnasında beraber çalışmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Dolayısıyla su ihtiyacı fazla olan hidrolik kireç karışımlarda lif kullanımının, karışımların dayanımları üzerinde belirgin bir olumlu etkisi olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. Harç karışımlarının erken yaşlardaki görüntüleri; a) 1 günlük, b) 3 günlük (Early age images of mortar mixtures; a) 1-day, b) 3-day)



Şekil 6. Harç karışımlarındaki büzülme çatlaklarının mikroskopik görünümü (Microscopic images of shrinkage cracks in mortar mixtures)

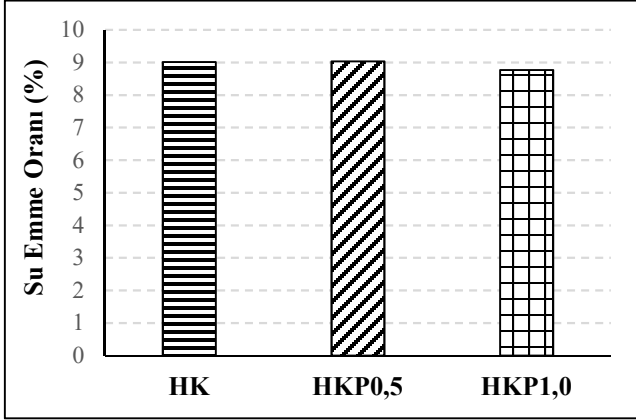
3.2. Su Emme Kapasitesi (Water Absorption Capacity)

Karışımların su emme kapasiteleri Şekil 7' de verilmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır. Şekil 7' den de anlaşıldığı gibi lif kullanımıyla ve kullanım oranının artışıyla karışımların su emme değerleri değişmemiştir.

Bilindiği gibi çimento esaslı malzemelerin su emme kapasitesi su/bağlayıcı oranı, çimentonun

tipi, karışım suyu miktarı, agrega türü ve özellikleri, katkı maddeleri, betonun yaşı, üretim koşulları, kütleme koşulları ve boşluk yapısı gibi parametrelerden etkilenmektedir [23].

Bu çalışma kapsamında söz edilen tüm etken parametreler sabit tutularak polipropilen lif ilavesiyle farklı harç karışımları hazırlanmıştır. Sonuçlardan da görüldüğü gibi lif kullanımı harç karışımlarının boşluk yapısını ciddi mertebede etkilememiştir.

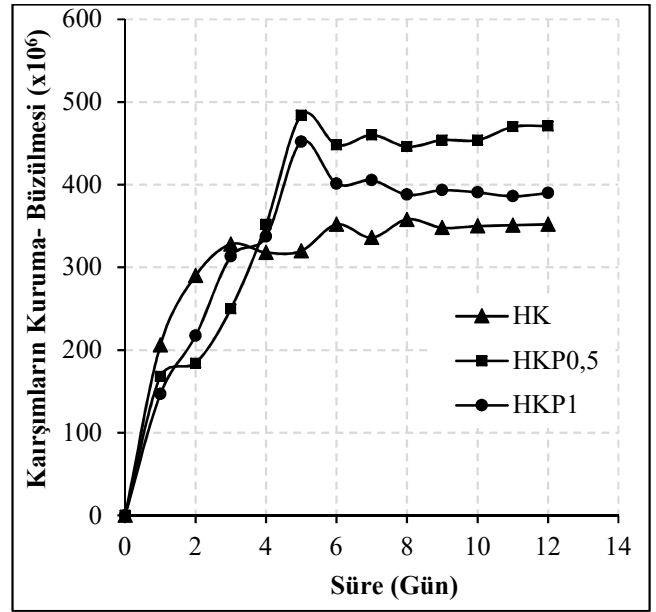


Şekil 7. Harç karışımların su emme kapasiteleri (Water absorption capacities of mortar mixtures)

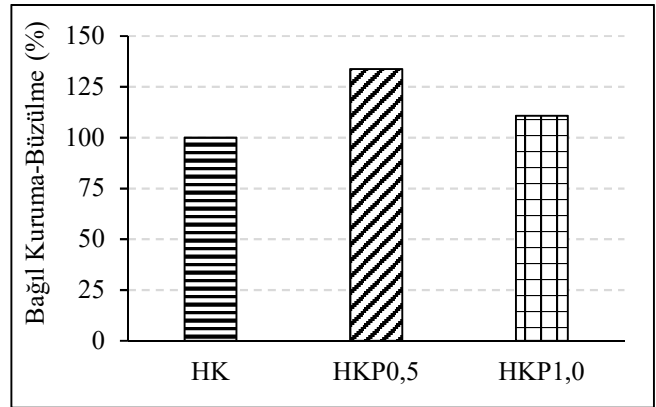
3.3. Kuruma-Büzülme (Drying-Shrinkage)

Harç karışımlarının 12 gün boyunca kuruma-büzülme değerleri Şekil 8’ de özetlenmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalaması olarak hesaplanmıştır. Beklenildiği gibi harç karışımlarının kuruma-büzülme değerleri ilk 5 günde hızlı artarken sonraki günlerde sabitlenmiştir. Karışımların dayanım özelliklerinde de tespit edildiği gibi, lif kullanımıyla ve kullanım oranının artışıyla beklenenin tersine büzülme değerleri artmıştır.

Şekil 9’ da da görüldüğü gibi 12 gün sonunda hacimce %0,5 polipropilen lif içeren HKP0,5 ve hacimce %1,0 polipropilen lif içeren HKP1,0 karışımları, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla yaklaşık olarak %34 ve %11 oranlarında daha fazla büzülme davranışı göstermiştir. Kontrol karışımı büzülme davranışı açısından en başarılı karışım olmuştur.



Şekil 8. Harç karışımların kuruma-büzülme değerleri (Drying-shrinkage values of mortar mixtures)



Şekil 9. Harç karışımların bağıl kuruma-büzülme değerleri (Relative drying-shrinkage values of mortar mixtures)

Bilindiği gibi, çimento esaslı karışımların büzülmesini engellemek amacıyla polipropilen lif kullanılmaktadır. Ancak bu çalışmada lif kullanımı ile beklenenin aksine karışımların büzülme miktarları artmıştır. Şekil 10’da görüldüğü gibi karışımların su/bağlayıcı oranının az olması sebebiyle kıvamı çok düşük ve kalıplara yerleştirmesi çok zor olan karışımlar üretilmiştir.

Daha öncede söylenildiği gibi, karışımın yüzeyinde aşırı miktarda büzülme kaynaklı çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 6). Böyle bir problemi ortadan kaldırmak için daha akıcı bir karışım üretilmesi önerilmektedir. Böyle bir karışımın matris ve lif arasındaki aderansın zayıf olduğu düşünülmektedir. Ayrıca söz konusu karışımlarda polipropilen lifin karışımlarda homojen bir şekilde dağılmama riski yüksektir.

Tüm bu olumsuz faktörler göz önüne bulundurularak, karışımların kuruma-büzülme değerinin artışı büzülme esnasında matris fazı ve lifin yekpare bir malzeme olarak çalışmadığından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 10. Harç karışımlarının yayılma deneyi (Slump test of mortar mixtures)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Lif içeren karışımların ve kontrol karışımının 1 günlük basınç ve eğilme dayanımları numuneler prizini almadığı için tespit edilememiş ve 3 günlük dayanım değerleri ise sıfıra yakın elde edilmiştir. Hacimce %0,5 polipropilen lif kullanılan karışımların 7 günlük basınç ve eğilme dayanımlarında kontrol karışımına kıyasla artış gözlenmiştir. Ancak karışımlarda hacimce %1 oranında lif kullanıldığında 7 günlük dayanımlarda azalmalar tespit edilmiştir. Lif içeren karışımların 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarında kontrol karışımına kıyasla aynı oranda azalmalar meydana gelmiştir. Su ihtiyacı fazla olan hidrolik kireç içeren karışımlarda lif kullanımının dayanımlar üzerinde belirgin bir olumlu etkisi olmadığı tespit edilmiştir.

Karışımlarda lif kullanımıyla karışımların su emme değerlerinde kayda değer bir değişiklik olmamıştır.

Lif içeren ve kontrol karışımlarının kuruma büzülme değerlerinde ölçüm başlangıcı sonrası 5 gün içinde hızlı bir artış tespit edilmiştir. 5 gün sonrasında devam eden günlerde önemli bir değişim belirlenmemiştir. Karışımlara lif ilave edilmesiyle karışımların büzülme değerlerinde artış tespit edilmiştir.

Karışımlarda matris ve polipropilen lifler arasında aderans sağlanamamıştır. Bu bağlamda matrisin ve polipropilen lifin beraber çalışma mekanizması gerçekleşmemiş, numunelerde büzülme kaynaklı çatlaklar meydana gelmiştir. Kireç esaslı

karışımlarda söz konusu aderansın sağlanması ve hamur fazının liflerle beraber işlevsel bir mekanizma oluşturabilmesi için daha yüksek su/kireç oranı kullanılması önerilmektedir.



TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Yazarlar çalışmada kullanılan su azaltıcı katkıların temini için Yüksek İnşaat Mühendisi Gökhan Yılmaz başta olmak üzere Polisan Kimya A.Ş.'ye teşekkür eder.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] P. Dariz and T. Schmid, "Ferruginous phases in 19th century lime and cement mortars: A Raman microspectroscopic study," *Materials Characterization*, vol. 129, pp. 9–17, 2017.
- [2] S. Xu, J. Wang, Q. Jiang and S. Zhang, "Study of natural hydraulic lime-based mortars prepared with masonry waste powder as aggregate and diatomite/fly ash as mineral admixtures", *Journal of Cleaner Production*, vol. 119, pp. 118-127, 2016.
- [3] M. Seabra, H. Paiva, J. Labrincha and V. Ferreira, "Admixtures effect on fresh state properties of aerial lime based mortars", *Construction and Building Materials*, vol. 23, no. 2, pp. 1147-1153, 2009.
- [4] M. Santarelli, F. Sbardella, M. Zuena, J. Tirillò and F. Sarasini, "Basalt fiber reinforced natural hydraulic lime mortars: A potential bio-based material for restoration", *Materials & Design*, vol. 63, pp. 398-406, 2014.
- [5] A. Izaguirre, J. Lanás and J. Alvarez, "Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 2, pp. 992-1000, 2011.
- [6] C. De Nardi, A. Cecchi, L. Ferrara, A. Benedetti and D. Cristofori, "Effect of age and level of damage on the autogenous healing of lime mortars", *Composites Part B: Engineering*, vol. 124, pp. 144-157, 2017.
- [7] P. Maravelaki-Kalaitzaki, A. Bakolas, I. Karatasios and V. Kilikoglou, "Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete", *Cement and Concrete*

- Research*, vol. 35, no. 8, pp. 1577-1586, 2005.
- [8] İ. Topçu, M. Canbaz ve H. Karanfil, "Horasan harç ve betonunun özellikleri", in *Yapı Mekaniği Semineri*, Eskişehir, 2005.
- [9] J. García-Cuadrado, A. Rodríguez, I. Cuesta, V. Calderón and S. Gutiérrez-González, "Study and analysis by means of surface response to fracture behavior in lime-cement mortars fabricated with steelmaking slags", *Construction and Building Materials*, vol. 138, pp. 204-213, 2017.
- [10] J. Grilo, A. Santos Silva, P. Faria, A. Gameiro, R. Veiga and A. Velosa, "Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions", *Construction and Building Materials*, vol. 51, pp. 287-294, 2014.
- [11] S. Fang, H. Zhang, B. Zhang and Y. Zheng, "The identification of organic additives in traditional lime mortar", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 15, no. 2, pp. 144-150, 2014.
- [12] L. Ventolà, M. Vendrell, P. Giraldez and L. Merino, "Traditional organic additives improve lime mortars: New old materials for restoration and building natural stone fabrics", *Construction and Building Materials*, vol. 25, no. 8, pp. 3313-3318, 2011.
- [13] A. Izaguirre, J. Lanas, and JI. Alvarez, "Effect of water-repellent admixtures on the behaviour of aerial lime-based mortars", *Cement and Concrete Research*, vol. 39, pp. 1095-1104, 2009.
- [15] M. Seabra, J. Labrincha and V. Ferreira, "Rheological behaviour of hydraulic lime-based mortars", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 27, no. 2-3, pp. 1735-1741, 2007.
- [16] M. C. A. D. D. M. Barbero-Barrera, O. Pombo, and M. D. L. Á. Navacerrada, "Textile fibre waste bindered with natural hydraulic lime," *Composites Part B: Engineering*, vol. 94, pp. 26-33, 2016.
- [17] Ş. Erdoğan, U. Kandil, S. Nayır ve M. Nas, "Uçucu kül ve polipropilen lif içeren kireç harçlarının tarihi yapıların güçlendirilmesi açısından değerlendirilmesi", *5. Tarihi Yapıların Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu*, Erzurum, 2015.
- [18] S. Barr, W. J. Mccarter, and B. Suryanto, "Bond-strength performance of hydraulic lime and natural cement mortared sandstone masonry," *Construction and Building Materials*, vol. 84, pp. 128-135, 2015.
- [19] B. Baradan, H. Yazıcı ve H. Ün, *Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık*, 1st ed. Türkiye Hazır Beton Birliği, 2010.
- [20] T. Kadioğlu, "Rötre Azaltıcı Katkı Maddeleri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [21] K. J. Folliard and N. S. Berke, "Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture," *Cement and Concrete Research*, vol. 27, no. 9, pp. 1357-1364, 1997.
- [22] TS EN 1097-6, Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler - Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini, TSE, Ankara, 2013.
- [23] P. Mehta and P. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education, 2006.
- [24] TS EN 196-1, Çimento deney metotları-Bölüm 1: Dayanım tayini, TSE, Ankara, 2016.
- [25] ASTM C596-09, Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, *ASTM International*, West Conshohocken, PA, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 17-05-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 22-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.314330	

Eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemine sezgisel bir çözüm yaklaşımı

Harun Reşit Yazgan^{*1}, Rabia Gökçen Büyükyılmaz²

ÖZ

Eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi; müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerinin eş zamanlı olarak karşılandığı bir araç rotalama problemidir. Bu çalışma kapsamında bir ana depo üzerinden 76 müşteriye hizmet sağlayacak bir firmanın araç rotalama problemi ele alınmıştır. Minimum sayıda araç kullanımı ile gidilen mesafeyi en küçükleyecek araç rotalarının oluşturulması hedeflenmiştir. Problem çözümü için literatürde yer alan karışık tamsayı matematiksel model kullanılmış ve sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir. Farklı büyüklükteki veri setlerine algoritma uygulanmış elde edilen çözümler regresyon analizi ile değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: eş zamanlı topla dağıt araç rotalama problemi, en kısa yol yöntemi, regresyon analizi

A solution approach for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery

ABSTRACT

Simultaneously pickup and delivery problem is a vehicle routing problem that pickup and delivery demands of customers in each route are met simultaneously. The vehicle routing problem of a company provides delivery service to 76 customers from a depot is solved. The main objective is to create vehicle routes which minimize the distance travelled using the minimum number of vehicles. A MILP and a new heuristic algorithm are proposed to solve the problem. The algorithm was applied different data sets and results are evaluated with regression analysis.

Keywords: vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery, the shortest path algorithm, regression analysis

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araç rotalama problemleri depolardan müşterilere, talep edilen ürünlerin araç filoları vasıtasıyla taşınması olarak düşünülebilir. Günümüzde;

üretim kaynaklarının azalması, müşterilerin bilinçlenmesi, geri dönüşüm faaliyetlerinin işletmeler üzerinde ekonomik getirisinin olması, yasal ve çevresel sorumluluk gibi birçok faktöre bağlı olarak araç rotalama faaliyetlerinde

¹ Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü email:yazgan@sakarya.edu.tr

² Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü email:gokcen.buyukyilmaz@ogr.sakarya.edu.tr

müşterilerden ürünlerin toplanması da söz konusu olmaktadır [1]. Bu problem literatürde Topla Dağıt Araç Rotalama Problemi (TDARP) olarak adlandırılır. TDARP toplama ve dağıtım faaliyetlerinin gerçekleştirilmesine göre üç sınıfa ayrılmaktadır. Bunlardan birisi Eşzamanlı Topla Dağıt Araç Rotalama Problemidir (EZTDARP). Eş zamanlı dağıtım ve toplama yapılan araç rotalama problemleri, bir veya birden fazla depodan alınan müşteri taleplerinin, araçlara yüklenerek talep noktalarına ulaştırılmasını, müşteriden depoya geri gönderilecek malzemenin ise, araç müşteriye uğradığı anda aynı araca yüklenerek, araçların kat ettiği toplam yolu en küçükleyecek şekilde, depo/depolara gönderilmesini sağlayarak araç rotalarını oluşturan problemlerdir [2].

Çalışmada homojen filoya sahip EZTDARP için literatürde yer alan karışık tamsayı matematiksel model ele alınmıştır. Merkez bir depo üzerinden 76 adet müşteriye hizmet sağlanacak EZTDARP uygulamasının çözümü için en kısa yol yöntemini hedef alan algoritma geliştirilmiştir. Tüm müşterilerin dağıtım ve toplama taleplerini karşılayacak, en az sayıda araç kullanımıyla, kat edilen toplam mesafeyi minimize edecek araç rotalarının oluşturulması hedeflenmiştir. Aynı büyüklükteki müşteri kümesine farklı yükleme kapasitesindeki araçlar kullanıldığı durumda toplam gidilen mesafede oluşan değişkenliği ele alabilmek ve hizmet edilecek müşteri sayısı iki katına çıkarıldığı durumda geliştirilen algoritmanın performansını gösterebilmek için probleme yönelik olarak farklı senaryolar oluşturulmuştur. Toplam kat edilen mesafe üzerinde, hizmet edilecek müşteri sayısı ve araç kapasitesi faktörlerinin etkisinin istatistiksel olarak varlığını ve etki derecesini belirleyebilmek için hipotez kurulmuştur. Farklı büyüklükteki örnekler için algoritmanın sonuçları istatistiksel olarak analiz edilerek değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI (LITERATURE RESEARCH)

Eş zamanlı topla-dağıt araç rotalama problemi ilk olarak 1989 yılında gerçek bir kütüphane sistemi ele alınarak Min (1989) tarafından tanımlanmış [3], çözüm için önce kümele sonra rotalama yöntemi uygulanmıştır. Dethloff (2001) düğüm tabanlı bir matematiksel model önermiş ve çözümü için farklı ölçütlere göre ekleme stratejileri uygulayan tur kurucu sezgisel algoritma

önermiştir [4]. Crispim ve Brandao (2005) çalışmalarında değişken komşu iniş ve tabu arama algoritmalarını birleştiren melez bir meta sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [5]. Nagy ve Salhi (2005) sezgisel çözüm yaklaşımı geliştirmişlerdir [6]. Montane ve Galvao (2006) problem çözümü için tabu arama algoritması [7], Ropke ve Pisinger (2006) probleme zaman penceresi ekleyerek, çözüm için büyük komşuluk arama sezgiseli geliştirmişlerdir [8]. Chen (2006) tavlama benzetimi ve değişken komşu iniş algoritmalarından oluşan melez bir meta sezgisel algoritma [9], Bianchessi ve Righii (2007) yerel arama ve tabu arama algoritmaları geliştirmişlerdir [10]. Parrag ve ark. (2008a) dağıtım faaliyetlerinin depolar ve müşteriler arasında gerçekleştiği problem çeşitleri üzerine [11] Parrag ve ark. (2008b) ise dağıtım işlemlerinin toplama ve dağıtım birimleri arasında gerçekleştiği problem türleri olarak detaylı bir çalışma yapmışlardır [12]. Erbao ve ark. (2008) zaman penceresi ekleyerek problem çözümü için diferansiyel evrim algoritması ile genetik algoritmadan oluşan melez bir algoritma önermişlerdir [13]. Ai ve Kachitvichyanukul (2009) problem çözümü için kuş sürüsü en iyileme algoritması geliştirmişlerdir [14]. Karlaftis ve ark. (2009) zaman kısıtları altında özel bir konteynır filosunun rotalama problemini ele almışlar, çözümü için hibrid genetik algoritma geliştirmişlerdir [15]. Zachariadis ve ark. (2009) yerel arama ve tabu arama algoritmalarından oluşan melez meta sezgisel algoritma oluşturmuşlardır [16]. Gajpal ve Abad (2009) başlangıç çözümü en yakın yol metodu ile oluşturulan, yerel arama prosedürü her bir karınca çözümü üzerinde uygulanan karınca kolonisi algoritması geliştirmişlerdir [17]. Mingyong ve Erbao (2010) zaman penceresi ilave ederek problemi ele almışlar, çözüm için geliştirilmiş diferansiyel evrim algoritması önermişlerdir [18]. Zachariadis ve ark. (2010) adapte edilebilir hafıza metodolojisi çerçevesinde çözüme gitmişlerdir. [19]. Subramanian ve ark. (2010) değişken komşu iniş algoritması ile rastgele komşu sıralama algoritmalarını entegre ederek sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [20]. Çatay (2010) başlangıç çözümünü en yakın komşu arama algoritmasıyla oluşturan karınca kolonisi algoritmasını geliştirmiştir [21]. Çetin ve Gencer (2010) probleme zaman penceresi ve heterojen filo ilave ederek çözüm için karar destek sistemi oluşturmuşlardır [22]. Fan (2011) zaman kısıtı ilave ederek, kat edilen toplam mesafeye bağlı maliyetin azaltılmasını ve toplam müşteri

memnuniyetinin artırılmasını hedefleyen yeni bir model önermiş, çözümü en ucuz ekleme metodu ve tabu arama algoritması kullanarak elde etmiştir [23]. Subramanian ve ark. (2011) dal-kesme algoritması geliştirerek kesin çözüm yaklaşımı önermişlerdir [24]. Zachariadis ve Kiranoudis (2011) özel tabu arama kriterleri kullanılarak yerel arama algoritması geliştirmişlerdir [25]. Tasan ve Gen (2012) genetik algoritma yaklaşımı önermişlerdir [26]. Zhang ve ark. (2012) stokastik seyahat süresine dayalı problem için dağıtım arama metodu ve genetik algoritma geliştirmişlerdir [27]. Wang ve Chen (2012) probleme zaman penceresi kısıtı eklemişler, çözüm için en ucuz ekleme ve genetik algoritma yaklaşımını önermişlerdir [28]. Cruz ve ark. (2012) en ucuz yerleştirme, çok yönlü en ucuz yerleştirme, değişken komşu arama, değişken komşu iniş ve yeniden yol arama ve tabu arama algoritmalarından oluşan sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [29]. Goksal ve ark. (2013) parçacık sürü optimizasyonu temelli sezgisel çözüm yaklaşımı sunmuşlardır [2]. Liu ve ark. (2013) evde sağlık bakımını sağlayan bir işletme için çeşitli kısıtlar ekleyerek yeni bir matematiksel model geliştirmişler, çözüm için genetik algoritma ve tabu arama algoritması kullanmışlardır [30]. Günther ve ark. (2015) zaman kısıtı ilave ederek, çözüm için değişken komşu arama algoritması önermişlerdir [31]. Wang ve ark. (2015) probleme zaman penceresi ekleyerek çözüm için paralel tavlama benzetimi algoritmasını önermişlerdir [32]. Avcı ve Topaloglu (2016) heterojen filoya sahip problem için tabu araması ve yerel arama algoritmalarından oluşan melez meta sezgisel algoritma geliştirmişlerdir [33]. Kalaycı ve Kaya (2016) karınca kolonisi algoritmasına dayalı değişken komşu arama algoritmasını geliştirmişlerdir [34].

3. TOPLA DAĞIT ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ (VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH PICK UP AND DELIVERY)

Topla dağıtım araç rotalama problemi, bir merkezden müşterilere yapılacak dağıtım faaliyeti ile müşterilerden merkezi birime taşınacak toplama faaliyetlerinin aynı araçlarla yapıldığı problem türüdür [35]. TDARP kendi içerisinde alt türlere ayrılmaktadır:

- ✓ Önce dağıtım sonra topla araç rotalama problemi
- ✓ Karma topla dağıtım araç rotalama problemi

- ✓ Eş zamanlı topla dağıtım araç rotalama problemi

Önce dağıtım sonra topla araç rotalama problem; müşterilerin dağıtım ve toplama müşterileri olmak üzere iki gruba ayrıldığı, aracın izlediği rotada dağıtım müşterilerine toplama müşterilerinden önce hizmet verildiği problem türüdür [36]

Karma topla dağıtım araç rotalama problemi; müşteri önceliklerinin kaldırıldığı, araçların rota üzerindeki toplama ve dağıtım müşterilerine karışık sırada hizmet verebildiği problem türüdür [35].

Eş zamanlı topla dağıtım araç rotalama probleminde; depodan ya da dağıtım merkezinden hareket eden araç, rotası üzerinde yer alan her müşteriye talep ettiği miktarda ürünü teslim ettikten sonra aynı araç eş zamanlı olarak müşteriden arz edilen miktarı toplayarak depoya geri döner. Müşteriye önce verilecek ürün bırakılmakta sonra müşteriden toplanacak ürün alınmaktadır. Her müşteri herhangi bir ayrıma tabi tutulmaksızın yalnızca bir kez hizmet görmektedir. Gıda sektöründe, marketlere içeceklerin dağıtıldıktan sonra aynı marketlerden boş şişelerin geri dönüşüm amaçlı toplanması, otomobil, bilgisayar parçaları, elektronik cihazlar, endüstri ekipmanlarının teslimatı ve yeniden üretim veya geri dönüşüm amaçlı olarak toplanması bu problem tipine örnek olarak verilebilir [16].

3.1. EZTDARP Matematiksel Modeli (SPDVRP Mathematical Model)

EZTDARP'nin literatürde yer alan matematiksel tanımı ve modeli aşağıda verilmiştir.

$G(N,A)$ yönlü bir serim olsun. Burada N düğüm kümesi ($N=\{0,..,n\}$) ve A ayrıt kümesidir. ($A=\{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$). N düğüm kümesinde 0 ile gösterilen düğüm, her biri Q kapasiteye sahip ve aynı özellikteki araçların bulunduğu merkezi bir depoyu temsil etmektedir. N düğüm kümesinde tanımlı, kalan düğümler ise müşterileri temsil etmektedir. Her i müşterisinin d_i kadar dağıtım talebi ve p_i kadar ise toplama talebi vardır. c_{ij} , $(i, j) \in A$ ayrıtının serim üzerindeki ağırlığını temsil etmektedir ve i düğümünden j düğümüne geçiş olması halinde i ile j düğümleri arasındaki mesafe, zaman, maliyet anlamında da kullanılmaktadır [16]. EZTDARP çözümü için önerilen modelde c_{ij} , i ile j düğümleri arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. ($V=\{1,2,..,m\}$), $k \in V$ olmak üzere her biri aynı özellikte, aynı sabit (F) ve değişken (v) maliyete sahip olan araç filosunu göstermektedir.

Araçlar parçalı dağıt-topla yapmamaktadırlar. Buna göre ele alınan problemin amacı, aşağıdaki kısıtlar sağlanacak şekilde, tüm müşterilere yalnızca bir kere hizmet yapıldığı minimum maliyetli rotaları planlamaktır. Bu da gerekli olan araç sayısına ve müşterilere hizmet sağlayan araç rotalarının kümesine karar vermeyi içerir.

Problemde; Mosheiov (1998) [37] modeline dayalı Montane ve Galvao (2006) ve Ai ve Kachitvichyanukul (2009)'un önerdikleri matematiksel model esas alınmıştır. Eş zamanlı dağıt topla probleminin matematiksel modeli aşağıda yer almaktadır:

Dizin Kümeleri ve Parametreler

- N :Müşteriler kümesi, $\{1,2,3, \dots, n\}$
 N_0 : Depo ve müşterilerden oluşan düğümler kümesi, $N_0 = N \cup \{0\}$
 V : Araçlar kümesi, $\{1,2,3, \dots, m\}$
 Q_k :Araç kapasitesi, $k \in V$
 F_k :Her aracın sabit maliyeti, $k \in V$
 v_k : Her aracın değişken maliyeti, $k \in V$
 c_{ij} : i ve j düğümleri arasındaki uzaklık, $i \in N_0, j \in N_0$
 d_j :j müşterisinin dağıtım talebi, $j \in N$
 p_j : j müşterisinin toplama talebi, $j \in N$

Karar Değişkenleri

X_{ijk} : $\begin{cases} 1, k \text{ nolu araç } i \text{ düğümünden } j \text{ düğümüne giderse} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases}$

y_{ijk} : k nolu araç i düğümünden j düğümüne gittiğinde, j. düğümüne gelene kadar toplanan kümülatif yük miktarını gösterir.

z_{ijk} : k nolu araç i düğümünden j düğümüne gittiğinde, j. düğümüne gelene kadar araçta dağıtılacak yük miktarını gösterir.

Amaç Fonksiyonu

$$MinZ = \sum_{k \in V} \sum_{j \in N} F_k X_{0jk} + \sum_{k \in V} \sum_{i \in N_0} \sum_{k \in V} v_k X_{ijk} C_{ij} \quad (1)$$

Kısıtlar

$$\sum_{k \in V} \sum_{i \in N_0} X_{ijk} = 1 \quad \forall j \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N_0} X_{ipk} - \sum_{j \in N_0} X_{pjk} = 0, \quad \forall p \in N_0, \forall k \in V \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} X_{0jk} \leq 1, \quad \forall k \in V \quad (4)$$

$$y_{0ik} = 0, \quad \forall i \in N, \forall k \in V \quad (5)$$

$$z_{i0k} = 0, \quad \forall i \in N, \forall k \in V \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{k \in V} y_{jik} - \sum_{i \in N_0} \sum_{k \in V} y_{ijk} = p_j, \quad \forall j \in N \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{k \in V} z_{ijk} - \sum_{i \in N_0} \sum_{k \in V} z_{jik} = d_j, \quad \forall j \in N \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in V} y_{i0k} = \sum_{i \in N} p_i \quad (9)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in V} z_{0ik} = \sum_{i \in N} d_i \quad (10)$$

$$y_{ijk} + z_{ijk} = Q_k X_{ijk}, \quad \forall i \in N_0, \forall j \in N_0, \forall k \in V \quad (11)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N_0, \forall j \in N_0, \forall k \in V \quad (12)$$

$$y_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in N_0, \forall j \in N_0, \forall k \in V \quad (13)$$

$$z_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in N_0, \forall j \in N_0, \forall k \in V \quad (14)$$

Modeldeki (1) numaralı eşitlik araç kullanım maliyeti ve taşıma maliyeti toplamını en küçüklemeyi hedefleyen amaç fonksiyonudur. (2) numaralı kısıt bütün düğümlerin yalnız bir kez ziyaret edilmesini, (3) numaralı kısıt hizmeti sağlanan düğümü aynı araç ile terk etmeyi sağlar. (4) numaralı kısıt her bir aracın yalnızca bir rota için kullanılmasını sağlar. (5) numaralı kısıt aracın topladığı yükü tur başında sıfıra eşitlemektedir. (6) numaralı kısıt aracın dağıtım yükünü tur sonunda sıfıra eşitler. (7) numaralı kısıt aracın topladığı yükün araç rotası boyunca artarak izlemesini, (8) numaralı kısıt aracın dağıtım yükünün araç rotası boyunca azalarak izlemesini sağlar. (9) numaralı kısıt aracın başlangıç noktasına dönüşte tur içinde topladığı yük miktar akışını; tur içinde yer alan düğümlerin toplam toplama taleplerine eşit olmasını sağlar. (10) numaralı kısıt aracın başlangıç noktasından itibaren tur içinde dağıtılacak yük miktar akışını; tur içinde yer alan düğümlerin toplam dağıtım taleplerine eşit olmasını sağlar. (11) numaralı kısıt rota içindeki herhangi bir müşteride aracın kapasitesinin aşılmasını engellemektedir. (12) numaralı kısıt değişkene 0-1 tamsayı değerini atar. (13) ve (14) numaralı kısıtlar işaret kısıtlarıdır.

4. ÖNERİLEN ÇÖZÜM AŞAMALARI (PROPOSED SOLUTION STEPS)

EZTDARP için önerilen çözüm aşamaları Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo1. Önerilen çözüm aşamaları (Proposed solution steps)

Aşama	Yapılan İşlemler
1	Verilerin toplanması
2	Geliştirilen sezgisel algoritma
3	İstatistiksel analiz

1.Aşama:

Problemin çözümü için ihtiyaç duyulan veriler toplanmıştır. Gerekli olan veriler aşağıdaki gibidir:

- ✓ Hizmet edilecek müşteri bilgisi
- ✓ Müşterilerin depoya ve birbirlerine olan uzaklıklarını gösteren mesafe matrisi
- ✓ Her bir müşteriye dağıtılacak ve müşterilerden toplanacak yük miktarı verisi

2. Aşama:

Problem çözümü için geliştirilen yöntem detaylı anlatılmıştır. Çözüm için klasik (kurucu) sezgisel algoritma sınıfında yer alan en kısa yol yöntemi ele alınmıştır. Algoritma adımlarının anlaşılabilirliğinin yüksek olması, problem için olurlu çözümü kısa bir süre içinde ürettiği için çalışmada bu yöntem tercih edilmiştir. Geliştirilen yöntemin işlem adımları Tablo 2’de, yönteme ilişkin akış diyagramı da Şekil 1’de verilmiştir.

3. Aşama:

Bağımlı değişken üzerinde birden fazla bağımsız değişkenin etkisini ölçmek için, problem çözüm sonuçlarına regresyon analizi uygulanmıştır. Sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiştir.

5. UYGULAMA (APPLICATION)

Çalışma kapsamında ele alınan problem, merkezi bir depodan günlük şişe süt sevkiyatı yapacak olan bir işletmenin müşterilerine talepleri doğrultusunda sevkiyatın yapılmasını, müşterilerden eş zamanlı toplama işlemini yaparak depoya sevkiyatın gerçekleştirilmesini içermektedir. Merkez depodan 76 müşteriye hizmet sağlanacaktır. Ele alınan problemde, müşteriler hem dağıtım hem de toplama müşterisidir. Bu durum klasik kapasite kısıtlı araç rotalama probleminin aksine, kapasite kontrolünü sağlamayı oldukça zorlaştırmaktadır. Araç kapasitelerinin verimli kullanıldığı bir rotalama sistemine ihtiyaç vardır. Araç yükleme

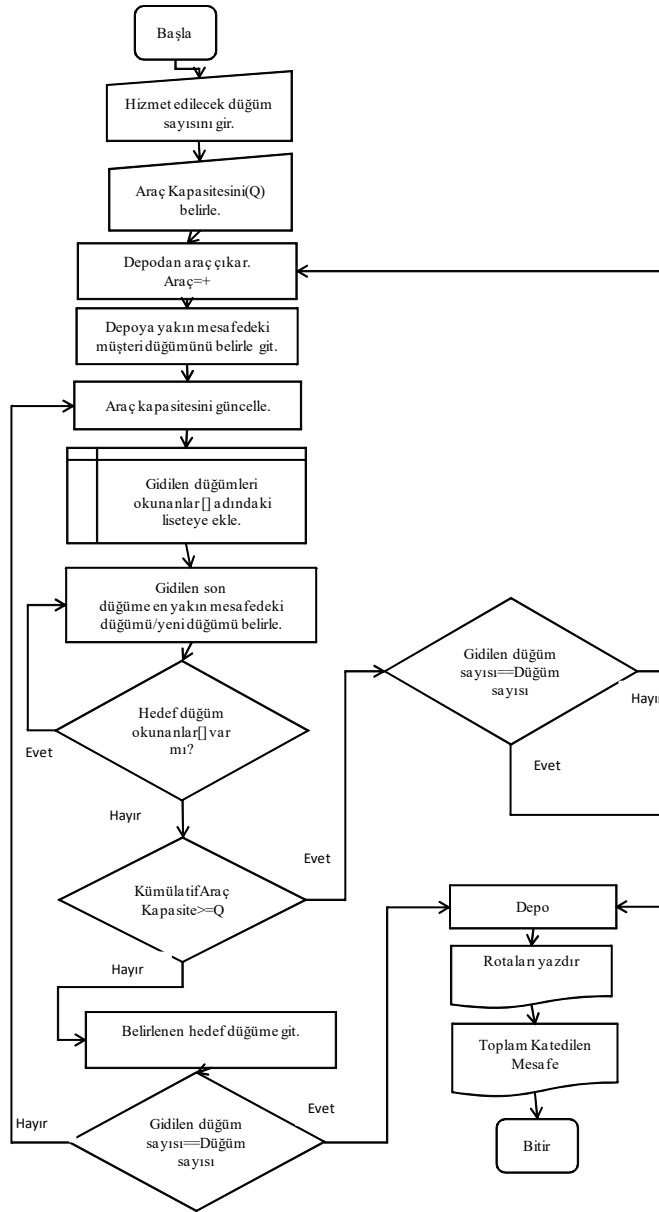
kapasitelerinin verimli kullanılması, toplamda kullanılacak araç sayısının azaltılmasında önemli bir etkidir. Uygulamada, depoda yer alan her bir aracın kapasitesi aşılmadan minimum sayıda araç kullanımı ile tüm müşterilerin hizmetini karşılayarak kat edilen mesafeyi minimize edecek şekilde araç rotalarının oluşturulması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmada işletmenin maksimum verimli araç kullanımı ile müşteri taleplerini karşılayacak dağıtım ve toplama rotalarının oluşturulması problemine çözüm getirilecektir. Bu şekilde dağıtım maliyeti de minimuma indirgenmiş olacaktır.

Buna göre:

- Her aracın rotası, merkezi depodan başlayıp, merkezi depoda sonlanmalıdır.
- Her bir araç sadece bir rota üzerinden faaliyet göstermelidir. Her müşteri yalnız bir tur üzerinde sadece bir defa ziyaret edilmelidir.
- Her müşteri hem ürün talebinde, hem de ürün arzında bulunur ve araç müşteriye uğradığında bu işlemler eş zamanlı olarak yapılır.
- Her rotada müşterilerden toplanacak toplam yük miktarı, müşterilere dağıtılacak yük miktarı, her müşteride yapılan dağıtım-toplama sonrasında aracın fiili yükü aracın kapasitesini aşmamalıdır.
- Her bir rotada gidilecek olan müşterilerin, dağıtım talepleri ile merkezi depoya sevk edilecek toplama talepleri tamamıyla karşılanmalıdır.
- Müşterilere teslim edilecek ve müşteriden toplanacak ürünler, aynı birim cinsinden ifade edilebilecek aynı tip ürünlerdir.

Tablo 2. Geliştirilen sezgisel algoritmanın adımları (The steps of the developed heuristic algorithm)

Adım	Yapılan işlemler
1	Gidilecek müşteri sayısı ve araç kapasitesi değişkenleri belirlenir.
2	Her müşterinin merkez depoya olan uzaklıkları değerlendirilir. Merkez depoya en yakın mesafedeki müşteri tespit edilerek, aracın rotasına müşteri atanır.
3	Araç kapasitesi güncellenir.
4	Dağıtım ve toplama talebi karşılanan müşteri bir listeye kaydedilir.
5	Gidilen son müşteriye en yakın mesafedeki müşteri/yeni müşteri, müşterilerin birbirlerine göre uzaklıklarından tespit edilir.
6	Tespit edilen müşteri daha önce ziyaret edilmiş müşterilerin kaydedildiği liste içerisinde olup olmadığı sorgulanır.
7	Liste içerisinde yer almıyorsa, hedef müşterinin dağıtım ve toplama yüküyle birlikte aracın toplam yükünün, araç kapasite koşulunu sağlayıp sağlamadığı sorgulanır.
8	Kapasite koşulu sağlanıyor ise Adım 5'te tespit edilen müşteri aracın rotasına atanır. Adım 3'e gidilerek işlem basamakları izlenir.
9	Araç kapasite koşulu sağlanmıyorsa depodan yeni araç çıkarılır. Adım 2'ye gidilerek işlem basamakları tekrarlanır.
10	Tespit edilen müşteri, daha önce ziyaret edilmiş müşterilerin kaydedildiği liste içerisinde yer alıyorsa Adım 5'e gidilir. İşlem basamakları izlenir.
11	Gidilen müşteri sayısı, müşteri sayısı değişkenine eşit ise algoritma sonlanır. Her aracın izlediği rota, kat ettiği mesafe ve toplam gidilen mesafe bilgisi rapor edilir.



Şekil 1. Geliştirilen sezgisel algoritmanın akış diyagramı (Flow diagram of the developed heuristic algorithm)

Problemin varsayımları:

- Hizmet tek bir merkezi depodan sağlanmaktadır.
- Araçlar rotalara başlamadan önce müşterilere dağıtılacak ve müşterilerden toplanacak miktarlar bilinmektedir.
- Araçlar depoda park halindedir. Özdeş kapasitede, aynı tip araçlar kullanılmaktadır. Taşıma işlemlerini yapacak yeterli sayıda araç depoda yer almaktadır.
- Yükleme ve dağıtım yapılan yükler istiflenme sırasında araç kapasitesini tam verimle kullanmaya engel teşkil etmemektedir.
- Trafik durumu, yol koşulları, araç arızası, sürücülerden kaynaklanabilecek olumsuz durumların olmadığı varsayılmaktadır.

Uygulama, önerilen çözüm yönteminin 3 aşamasına göre aşağıda anlatılmıştır:

1. Aşama:

Problemde kullanılacak müşterilere ait uzaklık verisi EK 1'deki tabloda kısmen gösterilmiştir. Burada algoritmanın içerisinde işlem kolaylığı olması açısından işletmeden başlanarak müşterilere 1-77 arası sıra numaraları verilmiştir. Uygulamada müşterilere tamsayı olarak 3-9 koli arasında değişen toplamda 428 koli ürün dağıtımını ve müşterilerden tamsayı olarak 1-8 koli arasında değişen toplamda 296 koli ürün toplama işlemi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, oluşturulan problem senaryosu için kullanılacak 152 müşteriye ait uzaklık verisi EK 2'deki tabloda kısmen gösterilmiştir.

2. Aşama:

Problem oluşturulan farklı senaryolara göre geliştirilen yöntemin işlem adımlarına göre çözülmüştür. Uygulamada araç yükleme kapasitesine göre toplam gidilen mesafede oluşan değişkenlik ele alınmıştır. Bunun için özdeş özelliklere sahip farklı taşıma kapasitelerindeki araçlar kullanıldığı durumlar için senaryolar oluşturulmuştur. Senaryolar Tablo 3'te yer almaktadır. Araç kapasitesi 50, 80 ve 100 koli olan araçlar kullanıldığında oluşan rota bilgisi ve kat edilen mesafe verileri elde edilmiştir.

Tablo 3. Senaryolar (Scenarios)

Senaryolar	Müşteri sayısı	Kapasite
Problem 1	76	50
Problem 2	76	80
Problem 3	76	100
Problem 4	152	50

Problem 1:

76 müşterinin dağıtım ve toplama taleplerini karşılayarak, minimum sayıda araç kullanımı ile kat edilen toplam mesafeyi en küçükleyecek araç rotalarının oluşturulması hedeflenmiştir. Aynı tip ve özellikte kapasiteleri 50 koli olan araçlar kullanılmıştır.

Tablo 4. Kapasite 50 birim için problem çözümü (Problem solution for 50 units of capacity)

Kapasite: 50 koli; müşteri sayısı:76

Araç No	Araç Rota Bilgisi	Kat edilen Mesafe(m)
1	Depo-3-36-23-46-20-17-18-45-Depo	6579
2	Depo-64-58-61-59-62-63-60-Depo	11344
3	Depo-65-49-50-51-53-54-52-Depo	8840
4	Depo-69-71-67-73-76-31-33-19-Depo	9890
5	Depo-5-4-6-2-1-55-30-56-Depo	9307
6	Depo-70-11-10-12-66-68-28-39-25-38-Depo	11450
7	Depo-57-22-42-41-44-21-16-48-27-40-15-Depo	9759
8	Depo-74-14-13-24-47-43-26-29-34-37-Depo	10799
9	Depo-32-35-72-75-8-9-7-Depo	13460
Toplam kat edilen mesafe:		91428

Araç kapasitesi 50 iken 76 müşteriye hizmetin sağlanabilmesi için 9 adet araca ihtiyaç vardır. Araçlar toplam 91428 metre mesafe gitmişlerdir. Problem 1'e ait çözüm sonuçları Tablo 4'te yer almaktadır.

Problem 2:

76 müşteriye hizmet sağlayarak, toplam mesafeyi en küçükleyecek araç rotalarının oluşturulması için aynı tip ve özellikte kapasitesi 80 koli olan araçlar kullanılmıştır. Problem 2'ye ait çözüm sonuçları Tablo 5'te yer almaktadır.

Tablo 5. Kapasite 80 birim için problem çözümü (Problem solution for 80 units of capacity)

Kapasite: 80 koli; müşteri sayısı:76		
Araç No	Araç Rota Bilgisi	Katedilen Mesafe(m)
1	Depo-3-36-23-46-20-17-18-45-42-22-41-44-38-25-28-39-Depo	6949
2	Depo-64-58-61-59-62-63-60-65-49-50-51-53-Depo	12260
3	Depo-69-71-67-73-76-31-33-19-29-26-15-47-43-48-27-40-Depo	10790
4	Depo-5-4-6-2-1-55-30-56-52-57-54-21-16-Depo	11598
5	Depo-70-11-10-12-66-68-14-74-13-24-34-37-32-35-72-75-Depo	12530
6	Depo-8-9-7-Depo	11770
Toplam kat edilen mesafe:		65897

Problem 3:

76 müşteriye hizmet sağlayarak, toplam mesafeyi en küçükleyecek araç rotalarının oluşturulması için aynı tip ve özellikte kapasitesi 100 koli olan araçlar kullanılmıştır. Problem 3'e ait çözüm sonuçları Tablo 6'da yer almaktadır.

Tablo 6. Kapasite 100 birim için problem çözümü (Problem solution for 100 units of capacity)

Kapasite: 100 koli; müşteri sayısı:76		
Araç No	Araç Rota Bilgisi	Katedilen Mesafe (m)
1	Depo-3-36-23-46-20-17-18-45-42-22-41-44-38-25-28-39-31-33-19-Depo	7729
2	Depo-64-58-61-59-62-63-60-65-49-50-51-53-54-52-Depo	12880
3	Depo-69-71-67-73-76-74-14-13-24-47-15-43-48-27-40-16-30-56-Depo	10259
4	Depo-5-4-6-2-1-55-57-21-26-29-34-37-32-35-72-75-8-9-Depo	14997
5	Depo-70-11-10-12-66-68-7-Depo	12450
Toplam kat edilen mesafe:		58315

Taşımayı gerçekleştirecek araçların kapasite miktarlarının en iyi şekilde belirlenmesi, mesafenin en küçüklenmesinde son derece önemlidir. 50, 80 ve 100 birimlik araçlar kullanıldığında, kapasiteye bağlı kullanılan araç sayısı ve araçların kat ettikleri toplam mesafelerde oluşan farklılık Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6'da görülmektedir. Algoritmadaki karar verici diğer unsurlara bağlı, araç kapasitesi aşıldığı durumda hizmet edilen son müşteriden araç depoya gönderilmektedir. Kalan müşterilere hizmet sağlamak için depodan gidilecek hedef müşteriler için yeni bir araç yola çıkmaktadır. Araçların

kapasitesinin yetersiz kaldığı durumda mevcut aracın depoya dönmesi ve yeni bir aracın depodan çıkmasından oluşan mesafeler toplam kat edilen mesafe miktarının artmasına neden olmaktadır. Araç kapasitesi ile toplam mesafe arasındaki ilişki 3. aşamada ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Problem 4:

Geliştirilen algoritmanın performansını daha iyi test edebilmek için 152 müşteriden oluşan, problem ele alınmıştır. Müşterilere tamsayı olarak 3-9 koli arasında değişen, varyansı 3,064 olan toplamda 850 koli ürün dağıtımı yapılmıştır ve müşterilerden tamsayı olarak 1-8 koli arasında değişen, varyansı 3,189 olan toplamda 585 koli ürün toplanmıştır. Aynı tip ve özellikte kapasitesi 50 koli olan araçlar kullanılmıştır. Problem 4'e ait çözüm sonuçları Tablo 7 ve Tablo 8'de yer almaktadır.

Tablo 7. 152 müşteri için problem çözümü (Problem solution for 152 costumers)

Kapasite: 50 koli; müşteri sayısı:152		
Araç No	Araç Rota Bilgisi	Katedilen Mesafe(m)
1	Depo-3-36-23-46-20-17-18-45-Depo	6579
2	Depo-64-58-83-120-1-4-5-2-Depo	7859
3	Depo-60-63-82-149-129-25-28-39-31-33-Depo	8743
4	Depo-65-119-121-91-132-10-11-66-Depo	9439
5	Depo-140-146-142-137-103-48-27-40-16-Depo	10356
6	Depo-134-12-130-117-80-110-98-84-Depo	10775
7	Depo-59-61-62-118-92-73-67-71-Depo	9249
8	Depo-135-97-72-75-14-74-Depo	9147
9	Depo-138-126-131-124-100-99-81-128-Depo	10892
10	Depo-141-6-69-70-68-125-87-148-86-Depo	11266
11	Depo-49-50-51-53-54-52-Depo	8470
12	Depo-139-108-113-22-42-41-44-38-21-43-Depo	10727
13	Depo-136-123-56-30-57-55-19-29-26-Depo	10606
14	Depo-145-88-127-101-93-94-104-32-Depo	12484
15	Depo-147-112-102-78-152-37-34-47-15-24-Depo	11986
16	Depo-77-8-9-144-151-111-89-35-13-Depo	13176
17	Depo-133-107-122-150-115-79-76-109-105-85-Depo	15624

Tablo 8. devam (continue)

Kapasite: 50 koli; müşteri sayısı:152		
Araç No	Araç Rota Bilgisi	Katedilen Mesafe(m)
18	Depo-106-114-95-116-96-90-143-7-Depo	16697
Toplam katedilen mesafe:		194075

faktörlerine bağlı olarak şekillendiği anlaşılmaktadır.

Regresyon analizi sonuç tablosunda yer alan verilerden toplam mesafenin alabileceği değer aşağıdaki şekilde formüle edilir:

Toplam mesafe = $41339,921 + 824,107 * \text{müşteri sayısı} - 484,679 * \text{kapasite}$

Oluşan denklem değerlendirilen iki parametreye göre, problemin çözümü olan en kısa mesafe değişkeninin değerini nasıl etkilediğini (değişkenler arasındaki ilişkiyi) matematiksel olarak göstermektedir.

3. Aşama:

Toplam gidilen mesafeyi en küçükleyecek olan araç rotalarının oluşturulması, hizmet edilen müşteri sayısı ve kullanılan aracın kapasitesine göre değişkenlik göstermektedir. Regresyon analizi ile taşıma maliyetinin oluşmasında en belirleyici unsur olan toplam kat edilen mesafe üzerinde, hizmet edilecek müşteri sayısı ve araç kapasitesi faktörlerinin etkisi ölçülmüştür. Regresyon analizine yönelik kurulan hipotez ise şu şekildedir:

- ✓ H_0 : Müşteri sayısı ile araç kapasitesi bağımsız değişkenlerinin, toplam mesafe bağımlı değişkeni üzerinde etkisi yoktur.
- ✓ H_a : En az bir bağımsız değişkenin, bağımlı değişken üzerinde etkisi vardır.

Regresyon analizi Tablo 9'daki çözüm sonuçlarına uygulanmıştır. Tablo 9'da yer alan N, hizmet sağlanacak müşteri sayısını; Q, homojen filo içerisindeki her aracın kapasitesini; k, toplam kullanılan araç sayısını; $\sum d_i$, müşterilere dağıtılacak toplam yük miktarını; $\sum p_i$, müşterilerden alınacak olan toplam yük miktarını göstermektedir.

Tablo 10 regresyon denklemi için kullanılan regresyon katsayılarını ve bunların anlamlılık düzeylerini vermektedir. Toplam mesafe ile müşteri sayısı ve kapasite arasındaki ilişki t istatistiği anlamlılık değeri $p < 0,0001$ olduğundan istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmektedir. Beta değeri (standardize edilmiş regresyon katsayısı), her bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken üzerinde tekil etkisini gösterir. Müşteri sayısı değişkeninin, toplam mesafe üzerinde en fazla etkiye sahip faktör olduğu görülmektedir. Toplam mesafe bağımlı değişkeniyle müşteri sayısı bağımsız değişkeninin arasında pozitif yönlü bir ilişki olduğu, araç kapasitesi ile negatif yönlü bir ilişki olduğu katsayılarından anlaşılmaktadır. R^2 değeri bağımlı değişkendeki varyansın (değişimin) % kaçının bağımsız değişken/değişkenler tarafından açıklandığını ifade etmektedir. Araçların toplam gittikleri mesafenin %89'unun, hizmet edilecek müşteri sayısı ile kullanılan aracın yükleme kapasitesi

Tablo 9. Çözüm sonuçları (Solutions)

N	Q	k	Toplam Mesafe	$\sum d_i$	$\sum p_i$	N	Q	k	Toplam Mesafe	$\sum d_i$	$\sum p_i$
20	50	3	31040	114	73	50	50	6	58866	256	161
20	80	2	21919	114	73	50	80	4	42486	256	161
20	100	2	25679	114	73	50	100	3	33377	256	161
22	50	3	31728	124	76	52	50	6	58757	270	173
22	80	2	21069	124	76	52	80	4	40487	270	173
22	100	2	22209	124	76	52	100	3	35107	270	173
24	50	3	32118	138	86	54	50	6	59026	284	184
24	80	2	21290	138	86	54	80	4	42886	284	184
24	100	2	20749	138	86	54	100	3	35186	284	184
26	50	4	32938	146	91	56	50	7	67338	298	194
26	80	2	21898	146	91	56	80	4	42207	298	194
26	100	2	21428	146	91	56	100	3	34627	298	194
28	50	4	42588	156	94	58	50	7	67305	308	202
28	80	2	22977	156	94	58	80	4	43536	308	202
28	100	2	21838	156	94	58	100	4	43807	308	202
30	50	4	40867	164	100	60	50	7	67374	320	211
30	80	3	34057	164	100	60	80	5	43375	320	211
30	100	2	23628	164	100	60	100	4	43947	320	211
32	50	4	40087	172	105	62	50	7	67606	334	222
32	80	3	32997	172	105	62	80	5	52627	334	222
32	100	2	22488	172	105	62	100	4	43238	334	222
34	50	4	40076	182	111	64	50	8	74726	346	231
34	80	3	34028	182	111	64	80	5	52435	346	231
34	100	2	24988	182	111	64	100	4	43857	346	231
36	50	4	40046	190	114	66	50	8	78618	360	243
36	80	3	33568	190	114	66	80	5	52938	360	243
36	100	2	25198	190	114	66	100	4	45417	360	243
38	50	5	50586	198	117	68	50	8	81039	370	250
38	80	3	32836	198	117	68	80	5	55585	370	250
38	100	2	25066	198	117	68	100	4	47047	370	250
40	50	5	50216	208	123	70	50	8	81768	384	261
40	80	3	32935	208	123	70	80	5	57716	384	261
40	100	3	25546	208	123	70	100	4	48916	384	261
42	50	5	49997	216	130	72	50	9	88220	396	271
42	80	3	33027	216	130	72	80	5	58216	396	271
42	100	3	35246	216	130	72	100	4	49257	396	271
44	50	5	49175	224	136	74	50	9	91598	404	276
44	80	3	32737	224	136	74	80	6	55798	404	276
44	100	3	33377	224	136	74	100	5	57797	404	276
46	50	5	48886	234	144	76	50	9	91179	414	284
46	80	3	32557	234	144	76	80	6	68037	414	284
46	100	3	3927	234	144	76	100	5	56906	414	284
48	50	6	48945	242	150	78	50	9	91428	428	296
48	80	4	32476	242	150	78	80	6	65897	428	296
48	100	3	33717	242	150	78	100	5	58315	428	296

Tablo 10. Regresyon analizi sonuç tablosu (Solution table of regression analysis)

Model	Katsayılar				
	Standart olmayan katsayılar		Standardize edilmiş katsayılar		Anlamlılık (p)
	B	Standart hata	Beta	t	
1 (Sabit)	41339,921	3058,583		13,516	,000
müşteri sayısı	824,107	36,895	,776	22,337	,000
kapasite	-484,679	31,083	-,542	-15,593	,000
a. Bağımlı değişken: toplam_mesafe					
Standart hata: 6059,103		R kare: 0,895		Düzeltilmiş R kare: 0,893	

6. SONUÇ (CONCLUSION)

İşletmelerin rekabet avantajı sağlayabilmesi için işletme içerisinde önemli bir yüzdeye sahip dağıtım maliyetlerinde iyileştirme sağlamaları gerekmektedir. Dolayısıyla işletme ve müşteri ihtiyaçlarına yanıt verecek dağıtım ağının tasarlanması, işletme karlılığı ve kaynaklarının verimli kullanımı açısından büyük önem arz etmektedir. Ele alınan işletmenin müşterilerinin hem dağıtım hem de toplama müşterisi olması nedeniyle hizmet vermek için kullanılan araçların kapasitelerinde dalgalanmaya sebep olmaktadır ve araçların kapasite kontrolünü sağlamayı zorlaştırmaktadır. Yapılan çalışmada işletmenin maksimum verimli araç kullanımı ile müşteri taleplerini karşılayacak dağıtım ve toplama rotalarının oluşturulması problemine çözüm getirilmiştir. Bu kapsamda işletmenin hizmet sağlayacağı 76 müşterisi için gidilen mesafeyi en küçükleyecek araçların günlük rotalama planları oluşturulmuştur. Probleme uygun çözüm üretebilmek için en kısa yol algoritması kullanılarak sezgisel bir yöntemle çözüm üretilmiştir. Oluşturulan farklı problem senaryoları geliştirilen yöntem ile çözülmüş, araçların izledikleri rotalar oluşturulmuş ve mesafe bilgileri hesaplanmıştır. Geliştirilen algoritma sonuçlarına göre; 76 müşteri için, yükleme kapasitesi 50 birimden (koli) oluşan özdeş araçlar kullanıldığında toplamda 9 araç kullanılarak toplam gidilen mesafe 91428 metre, 80 birimden (koli) oluşan özdeş araçlar kullanıldığında toplamda 6 araç kullanılarak toplam gidilen mesafe 65897 metre, 100 birimden (koli) oluşan özdeş araçlar kullanıldığında toplamda 5 araç kullanılarak toplam gidilen

mesafe 58315 metre olarak elde edilmiştir. Farklı yükleme kapasitelerine sahip araçların kullanılması durumunda; kullanılan araç sayısı ve araçların toplam gittikleri mesafelerdeki değişkenlik ele alınmıştır; taşımayı gerçekleştirecek araçların kapasite miktarlarının en iyi şekilde belirlenmesi, mesafenin en küçüklenmesinde son derece etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Regresyon analizi ile taşıma maliyetinin oluşmasında en belirleyici unsur olan toplam kat edilen mesafe üzerinde, hizmet verilecek müşteri sayısı ve araç kapasitesinin etkisi ölçülmüştür. Böylece amaç fonksiyonu çözüm değeri, parametrelere bağlı olarak kolayca tahmin edilebilecektir. Pratik hayatta da farklı senaryolar ele alınarak, değerlendirilen değişkenlere göre kolaylıkla karşılaştırma yapılabilir. Böylece problemi etkileyen bütün alternatif faktörlerin sonuçları, rasyonel çerçevede tahmin etmek mümkün olur. Bu da karar vermede büyük kolaylık sağlar.

EKLER (APPENDIX)

EK 1. Uzaklık matrisi 76 müşteri için-metre (Distance matrix for 76 customers)

Depo	1	2	.	74	75	76	
Depo 0	3750	3810	.	4550	4730	4520	
1	3750	0	509	.	930	1330	700
2	3810	509	0	.	890	1090	660
3	1200	480	440	.	459	869	240
4	3670	290	290	.	1140	1540	900
.	.	.	.	.	990	1490	760
74	4550	930	890	1370	0	430	350
75	4730	1330	1090	1600	430	0	1050
76	4520	700	660	1140	350	1050	0

EK 2. Uzaklık matrisi 152 müşteri için-metre (Distance
matrix for 152 customers-meter)

Depo	1	2	.	150	151	152	
0	3750	3810	.	4552	4736	4528	
1	3750	0	509	.	1340	750	850
2	3810	509	0	.	670	885	750
3	1200	480	440	.	350	460	764
4	3670	290	290	.	876	750	652
.	.	.	.	.	1621	2269	1548
150	4552	1340	670	1621	0	1300	2500
151	4736	750	885	2269	1300	0	2586
152	4528	850	750	1548	2500	2586	0

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ü. Şengül, «Tersine lojistik kavramı ve tersine lojistik ağ tasarımı,» *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, no. 10, 2011.
- [2] F. P. Goksal, İ. Karaoglan ve F. Altıparmak, «A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pick up and delivery,» *Computer Industrial Engineering*, no. 65, pp. 39-53, 2013.
- [3] H. Min, «The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and Pick up points,» *Transportation Research*, pp. 377-386, 1989.
- [4] J. Dethloff, «Vehicle routing and reverse logistics: the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up,» *OR Spektrum*, vol. 23, no. 1, pp. 79-96, 2001.
- [5] J. Crispim ve J. Brandao, «Metaheuristics applied to mixed and simultaneous extensions of vehicle routing problems With backhauls,» *Journal of the Operational Research Society*, vol. 56, pp. 1296-1302, 2005.
- [6] G. Nagy ve S. Salhi, «Heuristic algorithms for single and multiple depot vehicle routing problems with pickups and deliveries,» *European Journal of Operational Research*, no. 162, pp. 126-141, 2005.
- [7] F. A. T. Montane ve R. D. Galvao, «A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service,» *Computer Operations Research*, no. 33, pp. 595-619, 2006.
- [8] S. Ropke ve D. Pisinger, « A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls,» *European Journal of Operational Research*, vol. 171, pp. 750-775, 2006.
- [9] J. Chen, « Approaches for the vehicle routing problem with simultaneous deliveries and pick-ups,» *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, vol. 23, no. 2, pp. 141-150, 2006.
- [10] N. Bianchessi ve G. Righini, « heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery,» *Computers Operations Research*, no. 34, pp. 578-594, 2007.
- [11] S. N. Parrag, K. F. Doerner ve R. F. Hartl, « A survey on pick up and delivery problems part I: transportation between pickup and delivery locations,» vol. 58, no. 1, pp. 21-51, 2008a.
- [12] S. N. Parrag, K. F. Doerner ve R. F. Hartl, « A survey on pickup and delivery problems part II: transportation between pickup and delivery locations,» *Journal fur Betriebswirtschaft*, vol. 58, no. 1, pp. 81-117, 2008b.
- [13] C. Erbao, L. Minygyong ve N. Kai, « A differential evolution and genetic algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery and time windows,» *Proceedings of the 17th World Congress the International Federation of Automatic Control*, Korea, 2008.
- [14] J. Ai ve V. Kachitvichyanukul, «A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery,» *Computers & Operations Research*, cilt 36, no. 5, pp. 1693-1702, 2009.
- [15] M. G. Karlaftis, K. Kepaptsoglou ve E. Sambracos, « Containership routing with time deadlines and simultaneous deliveries and pick-ups,» *Transportation Research Part E*, no. 45, pp. 210-221, 2009.
- [16] E. E. Zachariadis, C. D. Tarantilis ve C. T. Kiranoudis, « A Hybrid Metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up service,» *Expert System With Applications*, no. 36, pp. 1070-1081, 2009.
- [17] Y. Gajpal ve P. Abad, « An ant colony system for vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up,»

- Computers Operations Research*, cilt 36, pp. 3215-3223, 2009.
- [18] L. Mingyong ve C. Erbao, « An improved differential evolution algorithm for vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries and time windows,» *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, no. 23, pp. 188-195, 2010.
- [19] E. Zachariadis, C. D. Tarantilis ve C. T. Kiranoudis, «An Adaptive Memory Methodology For The Vehicle Routing Problem With Simultaneous Pick-ups And Deliveries,» *European Journal of Operational Research*, no. 202, pp. 401-411, 2010.
- [20] A. Subramanian, L. M. Drummond, C. Bentes, L. S. Ochi ve R. Farias, « A parallel heuristic for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery,» *Computers Operations Research*, no. 37, pp. 1899-1911, 2010.
- [21] B. Çatay, « A new saving-based ant algorithm for the vehicle routing problem,» *Expert Systems with Applications*, no. 37, pp. 6809-6817, 2010.
- [22] S. Çetin ve C. Gencer, « Kesin zaman pencereli eş zamanlı dağıtım toplamalı araç rotalama problemi,» *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 25, no. 3, pp. 579-585, 2010.
- [23] J. Fan, «The vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery Based on customer satisfaction,» *Advanced in Control Engineering and Information Science*, no. 15, pp. 5284-5289, 2011.
- [24] A. Subramanian, E. Uchoa, A. A. Pessoa ve L. S. Ochi, « Branch and cut with lazy separation for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery,» *Operations Research Letters*, no. 39, pp. 338-341, 2011.
- [25] E. E. Zachariadis ve C. T. Kiranoudis, « A local search metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries,» *Expert Systems with Applications*, no. 38, pp. 2717-2726, 2011.
- [26] S. Tasan ve M. Gen, «A genetic algorithm based approach to vehicle routing problem with simultaneous pick-up and deliveries,» *Computer Industrial Engineering*, no. 62, pp. 755-761, 2012.
- [27] T. Zhang, W. A. Chaovalitwongse ve Y. Zhang, «Scatter search for the stochastic travel time vehicle routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries,» *Computer Operations Research*, vol. 39, pp. 2277-2290, 2012.
- [28] H. F. Wang ve Y. Y. Chen, « A genetic algorithm for the simultaneous delivery and pick-up problems with time windows,» *Computer Industrial Engineering*, no. 62, pp. 84-95, 2012.
- [29] R. C. Cruz, T. C. Silva, M. J. Souza, V. N. Coelho, M. T. Mine ve A. X. Martins, «Genvns-Ts-CI-Pr: A heuristic approach for solving the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery,» *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, no. 39, pp. 217-224, 2012.
- [30] R. Liu, X. Xie, V. Augusto ve C. Rodriguez, « Heuristic approaches for a special simultaneous pick-up and delivery problem with time windows in home health care industry,» *European Journal of Operational Research*, no. 230, pp. 475-486, 2013.
- [31] H. O. Günther, O. Kulak, C. B. Kalayci ve O. Polat, « A perturbation based variable neighborhood search heuristic for solving the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery,» *European Journal of Operational Research*, no. 242, pp. 369-382, 2015.
- [32] C. Wang, D. Mu, F. Zhao ve J. W. Sutherland, « A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup-delivery and time windows,» *Computers Industrial Engineering*, no. 83, pp. 111-122, 2015.
- [33] M. Avci ve S. Topaloglu, « A particle swarm optimization for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery,» *Expert Systems With Applications*, no. 53, pp. 160-171, 2016.
- [34] C. B. Kalayci ve C. Kaya, «An ant colony system empowered variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery,» *Expert Systems With Applications*, no. 66, pp. 163-175, 2016.
- [35] İ. Karaoğlan, Dağıtım ağları tasarımında yer seçimleri ve eş zamanlı toplama dağıtım araç rotalama problemleri, Gazi Üniversitesi, Fen

Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği
Bölümü, Doktora Tezi. Ankara, 2009.

- [36] G. Dinç Yalçın, Önce dağıt sonra topla araç rotalama problemi için bulanık ortamda çok amaçlı yaklaşım ve uygulama, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2012.
- [37] G. Mosheiov, «Vehicle routing with pick-up and delivery tour partitioning heuristics,» Computers Industrial Engineering, vol. 34, no. 3, pp. 669-684, 1998.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 20-10-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 25-12-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.345461	

Çok Kanallı Yüzey Dalgası Analiz Yöntemi (MASW) ile Zemin Özellikleri ve Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi: Arifiye-SAKARYA Örneği

Serdar Kayacı¹, Ali Silahtar^{*2}, Mustafa Nuri Dolmaz¹

ÖZ

Deprem esnasında zemin davranışının önceden kestirilmesi, olası bir depremde meydana gelecek can ve mal kayıplarını en aza indirmede oldukça önem arz etmektedir. 17 Ağustos 1999 İzmit (Mw=7.4) ve 12 Kasım 1999 Düzce (Mw=7.2) depremleri Adapazarı bölgesinde önemli miktarda yapı hasarına ve beraberinde çok sayıda can kaybına neden olmuştur. Özellikle İzmit depremi sonrası Adapazarı bölgesinde yapılan çalışmalar, zemin özelliklerinin etkisiyle bölgede bazı alanlarda yapısal hasarın yanında yapılarda batma ve dönme meydana geldiğini göstermiştir. Bu nedenle Adapazarı ovasında zemin özelliklerinin belirlenmesi önem kazanmıştır. MASW tekniği sığ tabakalara ait kayma dalgası hızını elde etmede geliştirilmiş bir yöntemdir. Yöntem Arifiye ilçesinin zemin özelliklerinin belirlenmesi ve olası sıvılaşma alanlarının tespitinde kullanılmıştır. Bu doğrultuda toplamda 37 noktada veri kazanımı gerçekleştirilmiş ve her bir noktanın bir boyutlu derinlik-kayma dalgası hızı belirlenmiştir. Hız bigileri dikkate alınarak 5-10-15-20-25-30 m derinlik seviyesine ait ortalama V_s kat haritaları hazırlanmıştır. Bu veriler neticesinde zemin sınıflaması ve olası sıvılaşma alanları tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Arifiye, MASW, zemin sınıflaması, sıvılaşma

Determination of Soil Properties and Liquefaction Potential by Multi-Channel Surface Wave Analysis Method (MASW): Arifiye-SAKARYA Example

ABSTRACT

Preestimation of ground behavior during an earthquake is very important in reducing the loss of life and property that will occur in a possible earthquake. 17 August 1999 Izmit (Mw = 7.4) and November 12, 1999 Düzce (Mw = 7.2) have caused significant damage to the Adapazarı region and many casualties. Especially after the Izmit earthquake, studies conducted in the Adapazarı region have shown that some areas in the region affected by structural damage, as well as the effects of soil properties, are sinking and turning. In this direction, determination of soil properties in Adapazarı rub has gained importance. The MASW technique is an improved method for obtaining the shear wave velocity of the shallow layer. The method was used to determine the soil properties of the Arifiye district and to determine possible liquefaction areas. In this direction, data acquisition was performed at 37 points in total and one dimensional depth shear wave velocity was determined for each point. Taking into consideration the speed figures, average V_s fold maps of 5-10-15-20-25-30 m depth level are prepared. At the end of this data, floor classification and possible liquefaction areas were identified.

Keywords: Arifiye, MASW, soil classification, liquefaction

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

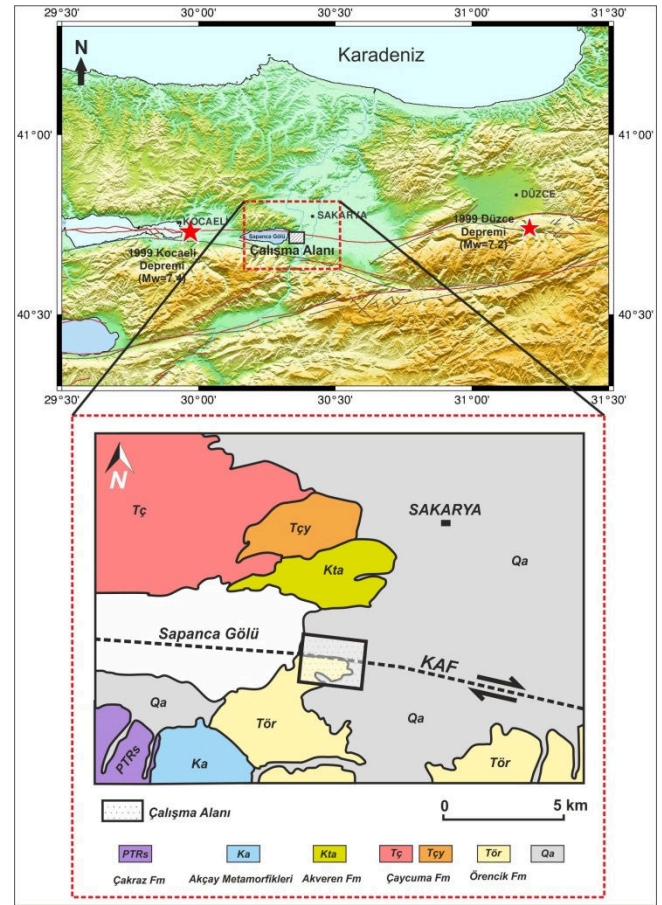
Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAFZ) ülkemiz tektoniğindeki aktif unsurlardan birisidir. Bu fay zonu üzerinde farklı segmentlerde geçmişten günümüze birçok deprem aktivitesi meydana gelmiştir. 17 Ağustos 1999 İzmit ve 12 Kasım 1999 Düzce depremleri yakın geçmişte KAFZ'nun batı kenarında meydana gelmiş yıkıcı depremlerdir [1, 2]. Özellikle yaklaşık 110 km'den fazla yüzey kırığı üreten [1, 3] 1999 İzmit depremi Marmara bölgesinin oldukça büyük bir kısmını etkilemiştir. Deprem odağına çok yakın olmamasına karşın zemin özelliklerinden kaynaklı Adapazarı bölgesi bu depremde oldukça fazla yapı hasarına uğramıştır [4]. Bu doğrultuda da 20,000'den fazla can kaybı yaşanmıştır. Deprem sonrası yapılan araştırmalar basen içerisinde bazı alanlarda 5 m'ye yakın bir yer değiştirmenin olduğu [2, 3] ve zeminde meydana gelen sıvılaşmanın etkisinde [5, 6, 7, 8] yapılarda, yıkımın yanında yan yatma ve ötelenme meydana geldiği gözlenmiştir.

Adapazarı havzasının büyük bir bölümü Sakarya Nehrinin etkisinde Kuvaterner yaşlı çökellerden oluşmaktadır [9]. Komazawa vd. 2002 [10] tarafından yapılan çalışmada bu çökellerin havza içerisinde kalınlığının yer yer yaklaşık 1000-1500 metreye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. Bu tür zeminlerde yapılacak zemin sınıflaması güvenli yapılaşma alan seçimine katkı sağlayacaktır. Ulusal ve uluslararası zemin sınıflama yönetmeliklerinde zemin sınıflaması 30 m derinliğin ortalama kayma dalgası hızı (V_{s30}) kullanılarak yapılabilmektedir. Yüzeysel dalgaları analizine dayanan MASW yöntemi yakın yüzeydeki bu bilginin elde edilmesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [11, 12, 13, 14]. Diğer taraftan V_s bilgisinin sıvılaşma direncinin kestirimine katkı sağladığı bilinen bir gerçektir [15, 16, 17]. Literatürde MASW tekniği kullanılarak farklı zeminlerde sıvılaşma potansiyeli tespitleri yapılmıştır [18, 19, 20, 21].

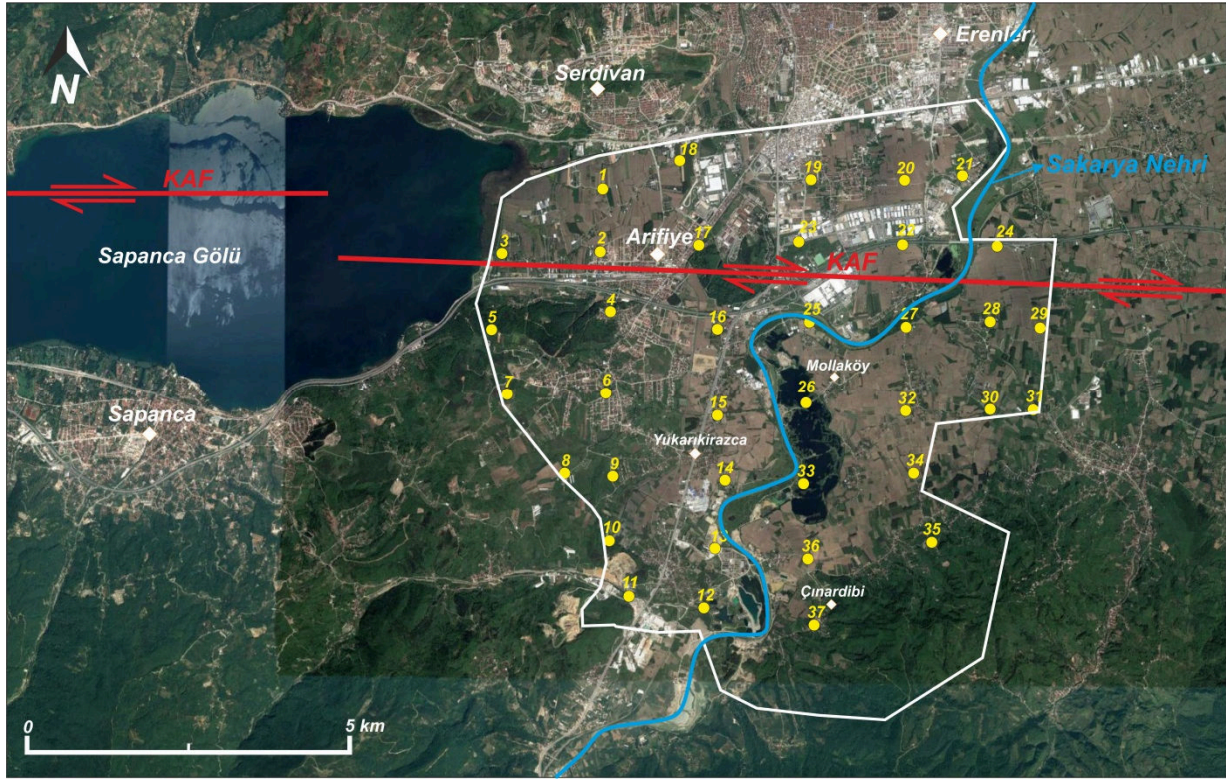
Bu çalışma kapsamında KAFZ'nun bir segmentinin yer aldığı Sakarya'nın Arifiye ilçesinin kayma dağılımı hızı ile zemin sınıflaması amaçlanmıştır. Diğer taraftan elde edilen V_s değerleri kullanılarak olası sıvılaşma alanlarının tespitine bir yaklaşım yapılmaya çalışılmıştır. Bu amaçla MASW yöntemi kullanılarak veri kazanımı yapılmış ve çalışma alanının zemin özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANI JEOLJİSİ (GEOLOGY OF THE STUDY AREA)

Çalışma alanı olan Arifiye Adapazarı ovasının güneyinde, Sapanca gölünün doğu sınırındadır. Ülkemiz tektoniğinin en önemli unsurları arasında yer alan KAFZ, çalışma alanındaki jeolojik birimleri ikiye ayırmış durumdadır (Şekil 1). Bunlardan kuvaterner yaşlı çakıllı ve siltli kum içeren alüvyon malzeme, Adapazarı bölgesinin büyük bir bölümünde gözlenmektedir. Bölgedeki bu alüvyon istif Sakarya ve Mudurnu nehirlerinin taşıdığı malzemeden oluşmuştur [5]. Havza içerisindeki sedimanlar kil, silt, kum ve çakıl aralanmaları şeklinde görülebileceği gibi bazen tek başına belirli bir seviyede yer alabilmektedir [4, 7]. KAFZ sınır olacak şekilde çalışma alanı içerisinde yer alan diğer birim pliyosen yaşlı Örencik formasyonudur (Tör). Orta ve kalın tabakalı bir yapıdaki formasyon içeriği kiltası, kumtaşı, çakıltaşı ve çamurtaşından oluşmaktadır [9].



Şekil 1. Çalışma sahasının yer bulduru haritası ve basitleştirilmiş jeoloji haritası, [9, 14]'den düzenlenmiştir (Location map of the study area and simplified geology map, modified [9, 14])



Şekil 2. MASW veri kazanım noktaları (MASW data acquisition points)

3. ÇOK KANALLI YÜZEY DALGASI ANALİZİ YÖNTEMİ (MULTI-CHANNEL SURFACE WAVE ANALYSIS METHOD)

Park vd. 1999 [22] tarafından geliştirilen MASW yöntemi, katmanlı bir zemin modelinde Rayleigh dalgasının oluşmasında baskın bir etkiye sahip S dalgasının dönüşmüş faz hızının tersinden bir boyutlu S dalga hızını elde etmede kullanılmaktadır [23]. Aktif bir sismik enerji kaynağı kullanılarak gerçekleştirilen MASW temelde üç aşamadan oluşmaktadır. Bunlar veri kazanımı, dispersiyon eğrisinin elde edilmesi ve ters çözüm işlemleridir. Veri kazanımında kullanılan ekipman esasen sismik kırılma ekipmanı ile benzerlik gösterir. Ancak yüze dalgalarını iyi kaydedebilmek için düşük frekanslı jeofonlar (4.5 Hz) tercih edilmelidir [22, 24, 25]. Veri kazanımında dikkat edilmesi gereken bir diğer husus alıcı aralığı ve ofset seçimidir. Dalga boyu ile ilgili olan bu seçimde, profil uzunluğu kayıt edilebilecek en büyük dalga boyu ile ilişkili araştırma derinliğini, jeofon aralığı ise en küçük dalga boyu ili ilişkili çözünürlüğü belirlemektedir [26]. Jeofon aralığının dx , en büyük araştırma derinliğinin Z_{max} ve ilk jeofonla son jeofon arasındaki mesafenin X olması durumunda; jeofon aralığının en büyük araştırma derinliğinin onda birinden küçük olması önerilir ($dx \leq 0.1 * Z_{max}$). Yakın alandan kaynaklı etkilerden kaçınmak için

yakın ofsetin en büyük araştırma derinliğinin yarısı olması gereklidir [27]. Toplam serim uzunluğu ise en büyük araştırma derinliğine eşit veya büyük olarak ($X \geq Z_{max}$) hesaplanmalıdır [28].

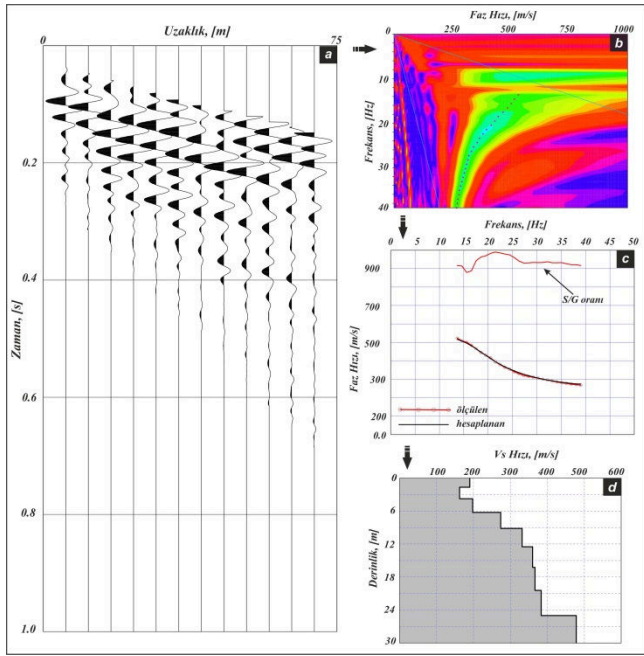
Çizgisel açılım ile zaman-uzaklık ($x-t$) ortamında kaydedilen veriye uygulanacak diğer işlem Xia vd. 1999 [24]'de tanımlandığı gibi frekans dalgasayısı dönüşümü ($f-k$) ile verinin frekans-faz hızı ($f-C_f$) ortamına aktarılmasıdır. Bu dönüşüm kaydedilen yüze dalgalarındaki frekans-faz hızı ilişkisini gözlemlemeyi mümkün kılar. Burdaki amaç faz hızının frekansla değiştiği Rayleigh dalgası dispersiyon eğrisinin elde edilmesidir. Dispersiyon eğrisi seçimi kesme dalgası hızının elde edilmesinde en önemli adımlardan biridir. Bu adımda her bir veri kazanım noktasındaki kayıtların frekans ortamındaki eğimlerinden ground roll dalgasının faz hızları hesaplanır [22, 23].

Yöntemin son aşaması Rayleigh dalgası faz hızı-frekans çiftlerinden oluşmuş dispersiyon eğrisinin ters çözüm işlemidir. S dalga hızının Rayleigh dalgası faz hızı üzerindeki baskın etkisi, ters çözüm işlemi neticesinde derinlik profiline karşılık S dalga hızının elde edilmesini sağlayacaktır. V_s bilgisinin hesaplanması dispersiyon eğrisinin belirli bir yoğunluk ve poisson değerinin tahminini gerektiren yinelemeli

ters çözüm ile hesaplanır. Bu süreci en küçük kareler yaklaşımı otomatik olarak gerçekleştirebilmektedir. En küçük kareler yaklaşımında her bir yineleme adımında bu parametrelerden yoğunluk ve poisson oranı sabit kalırken V_s bilgisi güvenilir olarak yakınsar. Ters çözüm işlemi hata oranının minimum olduğu yerde sonlandırılır [22, 24].

3.1. Veri Kazanım ve Veri İşlem (Data Acquisition and Data Processing)

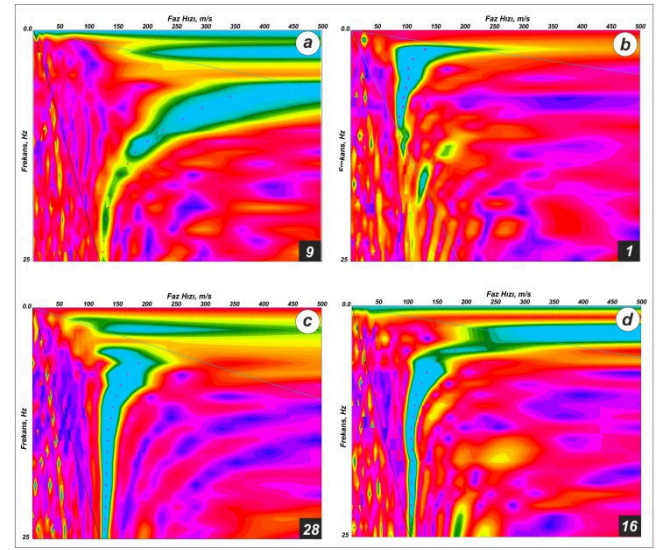
Çalışma alanında MASW veri kazanımı Arifiye ilçe sınırları içerisinde toplamda 37 noktada gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Veri kazanım esnasında sismik enerji kaynağı olarak 8 kg'lık balyoz kullanılmıştır. 12 kanallı sismik kayıtçının kullanıldığı saha çalışması sırasında jeofon aralığı 5 m, yakın ofset ise 20 m belirlenmiştir. Alıcı olarak yukarıda yöntemin teorisinde izah edildiği gibi 4.5 Hz düşey jeofonlar kullanılmıştır. Her bir ölçüm noktasında örnekleme aralığı 0,5 milisaniye, kayıt boyu 1 saniye olacak şekilde 12 adet tekrarlı ölçüm yapılarak S/G oranı güçlendirilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3. MASW veri işlem adımları, a: ham veri, b: dispersiyon seçimi, c: ters çözüm, d: 1 boyutlu derinlik- V_s modeli (MASW data processing steps, a: raw data, b: dispersion selection, c: inversion, d: 1-D depth- V_s model)

Yukarıda belirtilen veri kazanım parametreleri kullanılarak elde edilen sismik kayıt örneği Şekil 3.a'da verilmiştir. Zaman-uzaklık ($x-t$) ortamındaki bu veri ($f-k$) dönüşümü ile faz hızı-frekans ($f-C_f$) ortamına dönüştürülmüştür (Şekil 3.b). Herbir frekans değerine karşılık gelen faz hızı

değerlerinden meydana gelen dispersiyon eğrisi seçimi, S dalgası hız yapısının doğru ve güvenilir bir şekilde elde edilmesinde son derece önemlidir [29]. Şekil 4 üzerinde farklı veri kazanım noktalarına ait dispersiyon eğrisi seçimleri görülmektedir. Zemin özellikleri neticesinde bazen düşük frekanslarda (Şekil 4.c) bazen ise yüksek frekanslarda (Şekil 4.b) meydana gelen belirsizlik dispersiyon eğrisi seçimini bu frekanslarda sınırlamıştır. Yüksek ve düşük frekanslarda gözlenen kısmi belirsizlik durumlarında ise, Rayleigh dalgası esas modu dikkate alınarak dispersiyon eğrisi seçimini yapılmıştır (Şekil 4.a ve 4.d).



Şekil 4. Farklı MASW kayıtlarına ait dispersiyon eğrisi seçimleri, a: 9, b: 1, c: 28, d: 16 numaralı veri (Selection of dispersion curves for different MASW records, data number a: 9, b: 1, c: 28, d: 16)

Dispersiyon eğrisi seçiminin ardından V_s ve tabaka kalınlığı bilgisi için ters çözüm işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.c). Bilindiği üzere ters çözüm işlemi, derinlikle S-dalga hızının üretilmesi için her bir frekans bağımlı faz hızı eğrisine uygulanmalıdır [24]. Çalışma kapsamında MASW verilerinin ters çözümünde yinelemeli en küçük kareler yöntemi kullanılmıştır. Belirli bir başlangıç modeli kullanılarak gerçekleştirilen ters çözüm işlemi %5'den daha az hata oranları ile kesiktirilmiştir (Şekil 3.c, d).

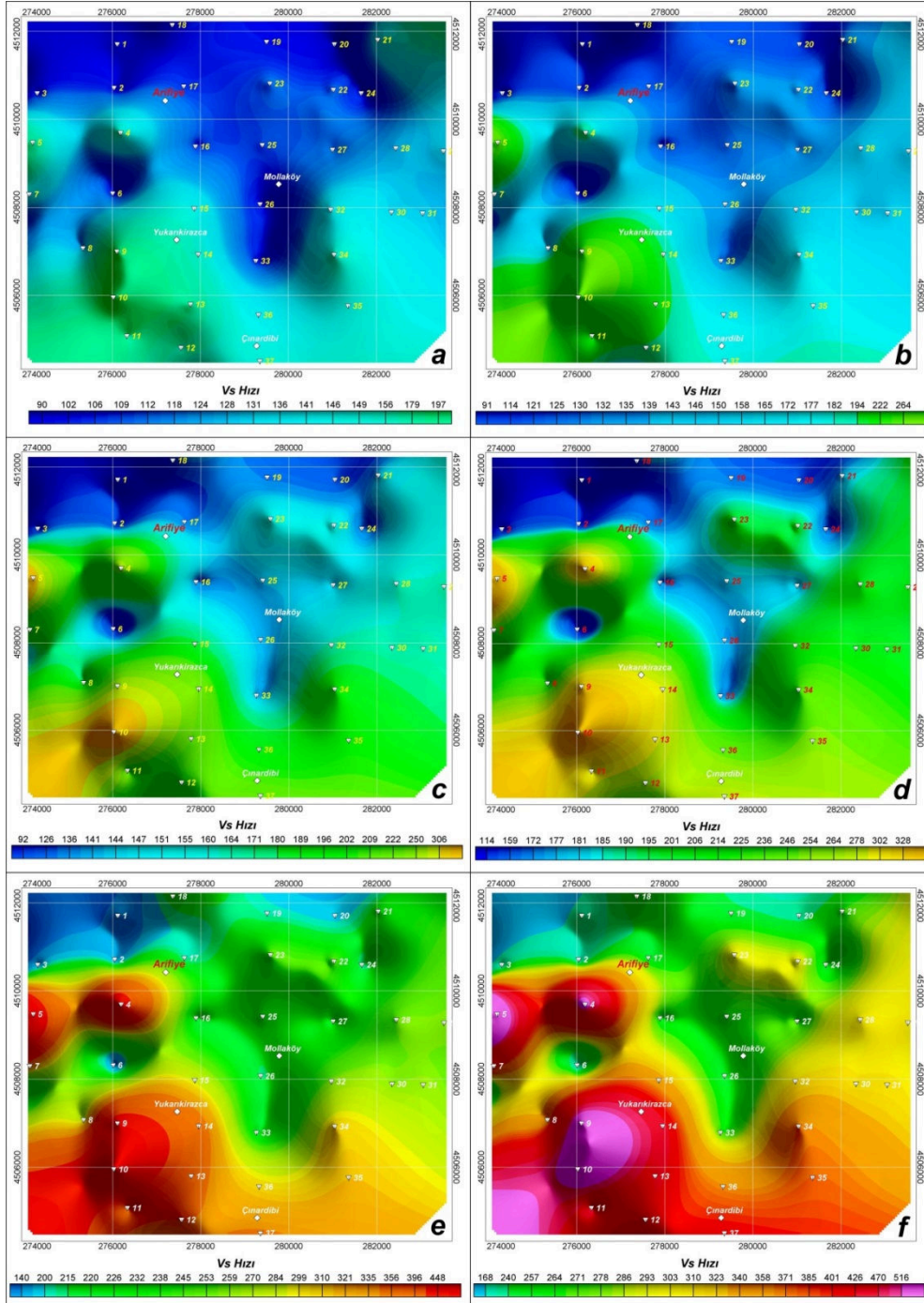
4. BULGULAR (RESULTS)

Kuvvetli yer hareketi esnasında zemin davranışının önceden belirlenmesi can ve mal kaybını en aza indirmede önemlidir. Bu bağlamda kayma dalgası hız bilgisine göre yapılan zemin sınıflama çalışmaları, deprem esnasında

hasar ve yıkıma neden olabilecek alanların tespitinde önem arz etmektedir.

Şekil 5 çalışma alanından elde edilmiş bir boyutlu MASW verilerinden elde edilmiş farklı derinlik seviyeleri için ortalama hız dağılımını göstermektedir. İlk 5 m derinliğin ortalama kayma dalgası hızının 200 m/s nin altında olduğu görülmektedir. Hızlardaki bu durum devam eden 10 ve 15 m derinlik seviyesinde çok fazla bir değişim göstermemekle birlikte, Örencik Formasyonuna karşılık gelen B-GB bölümünde ortalama hız verileri kısmi artışla 10 m’de 279 m/s,

15’de 330 m/s hıza ulaşmıştır. 20 m derinlikteki ortalama Vs dağılımı 113-341 m/sn aralığında değişmektedir. Seviye içerisinde güneyde Mollaköy sınır olacak şekilde ilk 15 m’de gözlenen düşük hız zonu kuzeye doğru yayılım göstermektedir. 25-30 m derinlik seviyesinde ortalama hız 470-549 m/s hız aralığına kadar yükseldiği gözlenmektedir. Ancak bu hız değerleri daha çok yapılaşma alanı dışında kalan tepelik ve dağlık alanları kapsamaktadır. Her iki derinlikte sadece çalışma alanının KB kesiminde Sapanca gölü sınırında çok düşük hız değerleri yer almaktadır.



Şekil 5. Farklı derinlik seviyelerine ait ortalama Vs dağılımı, a: 5m, b: 10m, c: 15m, d: 20m, e: 25m, f: 30m (The average Vs distribution of the different depth level, a: 5m, b: 10m, c: 15m, d: 20m, e: 25m, f: 30m)

Artan gözenek suyu basıncı etkin gerilmenin azalmasına ve malzemenin katıdan sıvıya geçmesine olanak sağlamaktadır. Jeoteknik ve deprem mühendisliğindeki en önemli problemlerden biri olan sıvılaşma ne yazık ki öngürülemez, ancak sıvılaşma potansiyeline sahip alanlar ayrıntılı çalışma ile tanımlanabilir [20]. V_s bilgisinin sıvılaşma direncinin tespitinde kaçınılmaz bir parametre olduğu bilinmektedir. Farklı zeminlerde yapılan araştırmalar yeraltı su seviyesi, zeminin dinamik özellikleri ve deprem büyüklükleri ile sıvılaşma direncinin değiştiğini göstermektedir [17]. Elde edilen derinlik- V_s verilerinin sıvılaşma açısından yorumlanmasında, MASW yöntemi ile sıvılaşma potansiyeli çalışmalarında [18, 20, 21] gözlemlenen 200 m/s V_s değeri sınır alınmıştır. Sıvılaşma direncinde etkili yeraltı su seviyesi inceleme alanında Örencik Formasyonunda 15 m civarında, alüvyonda 1-2 m civarında olduğu tespit edilmiştir. Buna karşılık Standart Penetrasyon Deneyi (SPT) değerleri Örencik formasyonunda 15 ile refü arasında değişirken, alüvyonda 2-15 arasında değiştiği gözlenmiştir [6, 8]. Bununla birlikte, araştırmalar sıvılaşmanın 20 m'den daha büyük derinliklerde nadiren gerçekleştiğini göstermiştir [19, 21, 30].

Tablo 1. NEHRP zemin sınıflama kriterleri, Boore, 2004'ten [31] düzenlenmiştir (NEHRP site classification, (modified from [31])

Zemin Sınıfı	Tanım	V_{s30} (m/s)
A	Sert kaya	$V_{s30} > 1500$
B	Kaya	$1500 > V_{s30} > 760$
C	Çok sert veya sert zemin	$760 > V_{s30} > 360$
D	Sert zemin (kil, kum, çakıl içerikli)	$360 > V_{s30} > 180$
E	Yumuşak zemin (killer ve kumlar)	$V_{s30} < 180$

Bu literatür verisi dikkate alınarak özellikle ilk 5-10 m V_s kat haritaları tekrar incelendiğinde, çalışma alanında büyük bir bölümde 200 m/s'den düşük hız yapısını temsil eden mavi tonları hakimdir. 15-20 m derinlikte ise bu seviye, alüvyon içerisinde Sakarya Nehri çevresi ve inceleme alanının KB sınırda yer alan Sapanca gölü devamında dağılım göstermektedir. Alüvyon birimde yer alan Arifiye merkez ve Mollaköy yerleşim alanlarını kapsayan bu düşük hız zonu, SPT sayıları (2-10) ve sığ yeraltı su seviyesi (1-2 m) ile ilişkilendirildiğinde sıvılaşma göstereceği olasıdır.

Kayma dalgası hızı ile zemin özelliklerinin belirlenmesinde zemin sınıflaması kriterleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada zemin sınıflama kriterlerinden V_{s30} (30 m derinliğin ortalama V_s hızı) verisini kullanan NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Programme) kriterleri tercih edilmiştir. Ulusal ve uluslararası literatürde kabul görmüş [11, 12, 31, 32] NEHRP kriterleri Tablo 1'de verilmiştir.

NEHRP zemin sınıflama kriterleri esas alınarak inceleme alanı için hazırlanmış zemin sınıflaması haritası Şekil 6'da verilmiştir. V_{s30} bilgine göre yapılan bu sınıflamada, alüvyon içerisinde kalan alanda D sınıfı hakim olmakla birlikte çok küçük bir bölümde E sınıfı yer almaktadır. Örencik formasyonuna karşılık gelen kısım ise zemin C sınıfı olarak tanımlanmıştır. Ancak Şekil 6'da D zemin sınıfı içerisinde yeşil renklendirme ile tanımlanan alanda, V_{s30} değerleri E zemin sınırına (180 m/s) oldukça yakındır. Bu durum Alüvyon alanda yüzeye yakın yeraltı su seviyesinin V_s hızı üzerindeki azaltıcı etkisi olmalıdır. Özellikle sanayi tesislerinin bulunduğu Arifiye merkezi ile Molla köy çok sağlam olmayan D türü zemin ile tanımlanmıştır. Kısmen sağlam veya sert olarak tanımlanabilecek C tipi zemin, yapılaşmanın ve yerleşimin az olduğu Yukarı Kirazca ve Çınar dibi gibi köylerin içerisinde yer aldığı bölgede tespit edilmiştir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

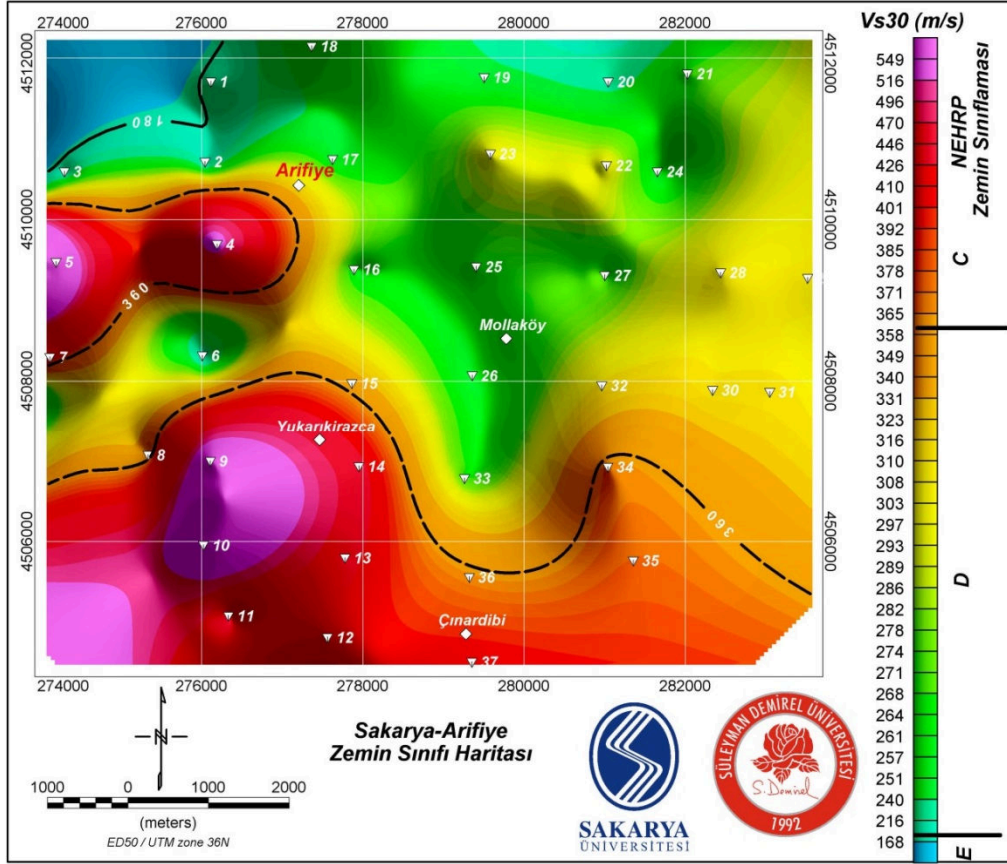
Bu çalışmada yüzeysel dalgası analiz yöntemlerinden MASW tekniği kullanılarak zemin sınıflaması ve potansiyel sıvılaşma varlığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Zemin sınıflamasında gerekli V_{s30} bilgisi için zeminde 30 metre derinliğe kadar V_s bilgisinin derinlikle değişimi araştırılmıştır. Diğer taraftan elde edilen derinlik- V_s değişimi sıvılaşma potansiyeli ile ilişkilendirilmiştir.

Ortalama kayma dalgası hızının derinlikle değişimini gösteren kat haritaları üzerinde (Şekil 5), kuvaterner yaşlı alüvyon dağılımı ile pliyosen yaşlı Örencik formasyonu sınırı açıkça gözlenebilmektedir. Ayrıca inceleme alanı içerisindeki Sakarya Nehrinin hız verileri üzerindeki düşürücü etkileri bütün derinlik seviyelerinde takip edilebilmektedir. Aynı kat haritalarında 200 m/s'den daha düşük V_s dağılımının hakim olduğu Arifiye merkez ve Mollaköy mevkiileri sıvılaşma riski içeren alanlar

olarak tespit edilmiştir. Çalışma alanını kapsayan [6, 8] tarafından yapılan araştırmalarda bu düşük hız zonlarında SPT değerlerinin 2-15, yeraltı su seviyesinin 1-2 m arasında değişmesi V_s 'den elde edilen bilgileri doğrular niteliktedir.

NEHRP zemin sınıflama kriterlerine göre çalışma alanında C, D ve E zemin grupları tespit edilmiştir. Endüstri tipi yapılaşmanın yoğun olduğu Arifiye

merkezi ve Mollaköy çok sağlam olmayan D türü zemin ile tanımlanmıştır. Göreceli sağlam olarak tanımlanabilecek C grubu zemin, düşük yapılaşma yoğunluğuna sahip Yukarı Kirazca ve Çınardibi köyleri mevkilerinde gözlenmiştir. Alüvyon birim içerisinde yer alan D ve E zemin grubu V_{s30} hız verileri oldukça düşüktür. V_{s30} değerlerindeki bu düşüklük yeraltı su seviyesinin düşürücü etkisi ile açıklanabilir.



Şekil 6. Çalışma alanı V_{s30} dağılımı ve NEHRP kriterlerine göre zemin sınıflaması, ters üçgen: veri kazanım noktası (V_{s30} distribution of study area and soil classification is given according to NEHRP site classification, inverted triangle: data acquisition point)

Sonuç olarak KAF gibi son derece aktif bir tektonik unsurun geçtiği çalışma alanının MASW yöntemi ile V_s bağımlı zemin özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların güvenilir yapı tasarımına katkı sağlayıp can kaybını azaltmasının yanında sanayi tesislerinin yoğun olarak görüldüğü bölgede ekonomik açıdan son derece maliyetli sanayi ekipmanlarının da korunmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)



[1] A. Barka, "The 17 august 1999 Izmit earthquake," *Science*, vol. 285, no .5435, pp. 1858-1859, 1999.

[2] R. M. Langridge, H. D. Stenner, T. E. Fumal, S. A. Christofferson, T. K. Rockwell, R.D. Hartleb, and A. A. Barka, "Geometry, slip distribution, and kinematics of surface rupture on the Sakarya fault segment during the 17 August 1999 Izmit, Turkey, earthquake," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92, no. 1, pp. 107-125, 2002.

[3] A. A. Barka, S. Akyüz, G. Sunal, Z. Çakır, A. Dikbaş, B. Yerli, T. Rockwell, J. Dolan, R. Hartleb, T. Dawson, T. Fumal, R. Langridge, H. Stenner, S. Christofferson, A. Tucker, R. Armijo, B. Meyer, J.B. Chabaliier, W. Lettis, W. Page, J. Bachhuber, "The surface rupture and slip distribution of the 17 August 1999

- Izmit earthquake (M 7.4), North Anatolian fault,” *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 92 no. 1, pp. 43-60, 2002.
- [4] S. Fırat, N. S. Işık, H. Arman, M. Demir, and İ. Vural, “Investigation of the soil amplification factor in the Adapazari region,” *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 75, no. 1, pp. 141-152, 2016.
- [5] R. B. Sancio, J. D. Bray, J. P. Stewart, T. L. Youd, H. T. Durgunoglu, A. Önalp, R. B. Seed, C. Christensen, M. B. Baturay, T. Karadayılar, “Correlation between ground failure and soil conditions in Adapazari, Turkey,” *Soil Dyn Earthquake Eng*, vol. 22 pp. 1093–1102, 2002.
- [6] S. Sert, A. Özocak, E. Arel, E. Bol, “Sakarya Bölgesinde Yerel Zemin Özelliklerinin Hasar Büyüklüğüne Etkisi, Arifiye-Geyve-Güneşler Örneği,” *Kocaeli Deprem Sempozyumu*, pp. 1214-1224, 2005.
- [7] Z. Kaya, A. Erken, “Adapazari zeminlerinin dinamik davranış özellikleri,” *İtüdergisi*, vol. 8, no. 5, pp. 157-168, 2009.
- [8] S. Sert, A. Özocak, and E. Bol, “GIS-based evaluation of the effect of local soil properties on the earthquake damage patterns, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol. 20, no. 3, pp. 689-699, 2016.
- [9] M. M. Sarıaslan, M. E. Yurdakul, Ç. R. Osman, M. Keçer, F. Basa, K. Şentürk, “Sakarya İlinin çevre jeolojisi ve doğal kaynakları,” *MTA Raporu*, No. 10195, 1998.
- [10] M. Komazawa, H. Morikawa, K. Nakamura, J. Akamatsu, K. Nishimur, S. Sawada, A. Erken, A. Önalp, “Bedrock structure in Adapazari, Turkey: a possible cause of severe damage by the 1999 Kocaeli earthquake,” *Soil Dyn Earthq Eng*, vol. 22, pp. 829-836, 2002.
- [11] E. Zor, M. Cevher, G. Mengüç, M. Soydabaş, A. Bilgiç, E. Ayan, S. Özalaybey, “Kocaeli İlinde Zemin Sınıflaması Ve Sismik Tehlike Değerlendirme Çalışmaları,” 6. *Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, pp. 133-144, 2007.
- [12] M. A. Sandıkkaya, M. T. Yılmaz, B. S. Bakır, Ö. Yılmaz, “Site classification of Turkish national strong-motion stations,” *J Seismol*, vol. 14, pp. 543-563, 2010.
- [13] P. Martínez-Pagán, M. Navarro, J. Pérez-Cuevas, F. J. Alcalá, A. García-Jerez, and S. Sandoval-Castaño, “Shear-wave velocity based seismic microzonation of Lorca city (SE Spain) from MASW analysis,” *Near Surf Geophys*, vol.12, pp. 739-749, 2014.
- [14] A. Silahtar, E. Budakoğlu, G. Horasan, E. Yıldırım, H. S. Küyük, E. Yavuz, and D. Çaka, “Investigation of site properties in Adapazari, Turkey, using microtremors and surface waves,” *Environmental Earth Sciences*, vol.75, no. 20, pp. 1354, 2016.
- [15] O. Uyanık, “Kayma Dalga Hızına Bağlı Potansiyel Sıvılaşma Analiz Yöntemi,” Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, pp. 200, 2002.
- [16] K. Özaydın, “Zeminlerde sıvılaşma,” *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, pp. 231-255, 2007.
- [17] O. Uyanık, A. G. Taktak, “Kayma Dalga Hızı ve Etkin Titreşim Periyodundan Sıvılaşma Çözümlemesi için Yeni Bir Yöntem,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol.13, no. 1, pp. 74-81, 2009.
- [18] C. P. Lin, C. C. Chang, and T. S. Chang, “The use of MASW method in the assessment of soil liquefaction potential,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 24, no.9, pp. 689-698, 2004.
- [19] Y. U. Shizhou, M. Tamura, and H. Kouichi, “Evaluation of Liquefaction Potential in terms of surface wave method,” *In The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. 12-17, 2008.
- [20] N. Sundararajan, and T. Seshunarayana, “Liquefaction hazard assessment of earthquake prone area: a study based on shear wave velocity by multichannel analysis of surface waves (MASW),” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 267-275, 2011.

- [21] E. O. Shelley, V. Mussio, M. Rodríguez, and J. G. A. Chang, "Evaluation of soil liquefaction from surface analysis," *Geofísica internacional*, vol.54, no.1, pp. 95-109, 2015.
- [22] C. B. Park, R. D. Miller, J. Xia, "Multi-channel analysis of surface waves (MASW)," *Geophysics*, vol. 64, pp. 800-808, 1999.
- [23] J. Xia, R. D. Miller, and C. B. Park, "Advantages of calculating shear-wave velocity from surface waves with higher modes," *Society of Exploration Geophysicists Expanded Abstracts*, pp. 1295-1298, 2000.
- [24] J. Xia, R. D. Miller, and C. B. Park, "Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves," *Geophysics*, vol. 64, no. 3, pp. 691-700, 1999.
- [25] C. B. Park, R. D. Miller, and H. Miura, "Optimum field parameters of an MASW survey," *Japanese Society of Exploration Geophysics Extended Abstracts*, 2002.
- [26] Ü. Dikmen, A. T. Başokur, İ. Akkaya, M. Ö. Arısoy, "Yüzey dalgalarının çok-kanallı analizi yönteminde uygun atış mesafesinin seçimi," *Yerbilimleri Dergisi*, vol. 31, no. 1, pp. 23-32, 2009.
- [27] K. H. Stokoe, G. W. Wright, A. B. James, and M. R. Jose, "Characterization of geotechnical sites by SASW method. In: Geophysical Characterization of Sites," R.D. Woods, (ed.), *Oxford Publishers*, New Delhi. 1994.
- [28] S. Nazarian, K. H. Stokoe, and W. R. Hudson, "Use of spectral analysis of surface waves method for determination of moduli and thicknesses of pavement systems," *Transportation Research Record*, vol. 930, pp. 38-45, 1983.
- [29] M. Z. Kanbur, A. Silahtar, and C. Özsoy, "Sığ Sismik Yansıma, MASW ve ReMi Yöntemleri ile Sığ Yapıların İncelenmesi: Isparta Yerleşim Merkezi Kuzeyi Pliyo-Kuvaterner Çökel Yapı Örneği," *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 15, no. 3, pp. 224-232, 2011.
- [30] H. B. Seed, I. M. Idris, "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 97, no. 9, pp. 1249-1273, 1971.
- [31] D. M. Boore, "Estimating Vs (30)(or NEHRP site classes) from shallow velocity models (depths < 30 m)," *Bulletin of the seismological society of America*, vol. 94, no. 2, pp. 591-597, 2004.
- [32] A. Silahtar, M. Z. Kanbur, "Senirkent Yerleşim Alanına ait Zemin Özelliklerinin ReMi Yöntemi İle İncelenmesi," *Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu*, pp. 69-75, 2015.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 26-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.340048	
	<u>Kabul/Accepted</u> 26-12-2017	<u>Online Access</u>	

Hayvan Yetiştiriciliğinden Kaynaklanan Kokulu Gazların Arıtımında Biyofiltrelerin Etkinliklerinin İncelenmesi

Edip Avşar^{*1}, Özgür Uyar², Kadir Alp², Asude Hanedar³

ÖZ

Çalışmada hayvan çiftliklerinden kaynaklanan ve amonyak içeren kokulu atık gazların biyofiltrelerle arıtılması araştırılmıştır. Biyofiltreler, düşük enerji gereksinimleri ve ilk kurulum maliyetinin düşüklüğü nedeniyle koku kontrolünde tercih edilmektedir. Bu nedenle, çalışmada hayvan barınaklarının aralıklı havalandırma uygulamasının simüle edilmesi için kesikli düzenle kurulan laboratuvar ölçekli reaktörler kullanılmıştır. Seri bağlı iki adet reaktöre kirletici olarak, konsantre amonyum hidroksit çözeltisinden hava geçirmek suretiyle elde edilen amonyak/hava karışımları beslenmiştir. Filtrelerde dolgu maddesi olarak evsel katı atıktan üretilmiş kompost ve odun talaşı karışımı kullanılmıştır. Farklı yükleme oranlarına karşılık amonyağın biyofiltrelerde aerobik-biyolojik olarak oksidasyon verimi ve bu verimi etkileyen faktörler incelenmiştir. Aklimasyon dönemi dahil 130 günlük süre içinde 1,32-27 g NH₃/m³.saat aralığında 8 farklı değerde yükleme yapılmış, ortalama amonyak giderim verimi % 97,2±1,8 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: amonyak; biyofiltre; hayvan besiciliği; koku

Investigation of the Treatment Efficiency of Biofilters In Terms of Odorous Gases Originated from Animal Breeding

ABSTRACT

In the study, treatment of odorous waste gases emitted from the cattle and sheep breeding facilities and poultry farms which containing ammonia were investigated by means of biofilters. Biofilters are preferred for odor control due to their low energy requirement and capital cost. For this purpose, bench scale batch reactors, were used to simulate the intermittent ventilation of animal barns. Ammonia/air mixtures used as pollution source were obtained by stripping the concentrated ammonium hydroxide via air and fed to two serially connected biofilter modules. Compost produced from domestic solid waste and sawdust mixture was used as a packing material in the filters. Factors affecting aerobic-biologic oxidation of ammonia in biofilters were investigated for different loading rates. During the 130 days which including the acclimation

¹ Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, eavsar@beu.edu.tr

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, uyaroz@itu.edu.tr

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, kalp@beu.edu.tr

³ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, ahanedar@nku.edu.tr

period, 8 different loads were loaded in the range of 1.32-27 g NH₃/m³.h and the average ammonia removal rate was found as 97.2% ± 1.8.

Keywords: ammonia; biofilter; animal breeding; odor

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Koku en karmaşık hava kirliliği problemlerinden biridir. İstenmeyen kokular; insanların yaşam biçimlerini etkileyen ve halk tarafından istenmeyen hava kalite problemlerine neden olmakta, kişilerin psikososyal sağlığını ve refahını etkileyen çevresel bir stres faktörü olarak değerlendirilmektedir [1,2].

Organik ve inorganik birçok bileşik çevrede koku kirliliğine neden olmaktadır. İnorganik bileşiklerden hidrojen sülfür (H₂S) ve amonyak (NH₃), organik kirleticilerden sülfür ve aminli organikler ile solvent grubundan ise klorlu ve klorsuz bileşikler en önemli kokulu bileşikler olarak tanımlanır [3,4]. Genel olarak; gıda işleme tesisleri, süt endüstrisi, ilaç üretim tesisleri, kauçuk işleme tesisleri, kağıt endüstrisi, tekstil endüstrisi, petrol rafinerileri, kimya endüstrisi, hayvancılıkla alakalı tesisler, katı atık ve kompost tesisleri ile atıksu arıtma tesisleri koku kirliliği ile ilgili en önemli kaynaklar olup, atık gaz emisyonları sebebiyle etki ettikleri kentsel alanlar en önemli şikayet kaynaklarıdır [1,4].

Kokuya neden olan kaynaklarda kokunun kontrol altına alınması için farklı prosesler uygulanabilmektedir. Bunların en yaygın olanları; fizikokimyasal (yoğunlaştırma, adsorpsiyon, absorpsiyon, oksidasyon, insinerasyon vb.) ve biyolojik (biyofiltreler) proseslerdir. Bunlar içinde biyofiltreler basit ve uygun maliyetli çözümler sunması nedeniyle, özellikle uçucu organik maddelerin gideriminde yoğun olarak tercih edilmektedir [3,5,6].

1.1. Hayvancılıkta Amonyak Emisyonu (Animal Breeding Ammonia Emissions)

Hayvancılık sektöründe koku ve gaz emisyonları; arazi uygulamaları, hayvan gübresi depolama tesisleri ve ahırlara ait havalandırmalardan kaynaklanmaktadır Bu tesislerden kaynaklanan en önemli emisyonlardan biri olan amonyak; koku şiddeti yüksek, renksiz bir gaz olarak tanımlanmakta olup hayvan dışkılarındaki ürenin mikroorganizmalar tarafından üreaz enzimi

kullanılarak parçalanması sonucunda ortaya çıkmaktadır [5,7]. Hayvan yetiştiriciliği için ortam havasındaki tipik konsantrasyon seviyesi 5-70 ppm olarak verilmekle birlikte, özellikle kümes hayvancılığı aktivitelerinde ortamdaki amonyak konsantrasyonunun 200 ppm mertebelerine kadar yükseldiği, bu yüksek konsantrasyonların ise maruz kalanlarda üst solunum yolu rahatsızlıklarına neden olduğu tespit edilmiştir [8,9].

ABD’de sadece kümes hayvanları yetiştiriciliğinden yılda 3,6x10⁶ ton amonyak havaya salınırken, Hollanda’da hayvancılık sektörü kaynaklı emisyonlar 1.14x10⁵ ton/yıl dolayındadır. Tarım sektörünün önemli olduğu Avrupa ülkelerinde ortalama emisyon 8x10⁶ ton/yıl dolayındadır. Kanada’da zirai kaynaklı amonyak emisyonlarının %80’ini ise çiftlik hayvanları yetiştiriciliğinden kaynaklanmaktadır [10,11].

Tablo 1’de çeşitli sektörlerden kaynaklanan NH₃ konsantrasyonu seviyeleri listelenmiştir.

Tablo 1. Farklı tesis tipleri için NH₃ konsantrasyonu seviyeleri (NH₃ emission levels for several facilities)

Tesis Tipi	NH ₃ Konsantrasyon	Kaynak
Domuz çiftliği	6,2-8,7 g/gün	[12]
Domuz çiftliği	0-28 mg/m ³	[13]
Kapalı ahır	11-28 mg/m ³	[14]
Civciv yetiştirme çiftliği	6-38 mg/m ³	[15]
Gübre depolama alanı	12-26 mg/m ³	[16]
Evsel atık ve arıtma	>70 mg/m ³	[17]
çamuru kompost tesisi	227-700 mg/m ³	[18]
atıkgazı	>1000 mg/m ³	[19]
Hayvan gübresi atıklarının kompost tesisi	>2000 mg/m ³	[20]

1.2. Amonyak İçeren Kokulu Gazların Biyofiltrelerde Arıtımı (Treatment of Odorous Gases Containing Ammonia In Biofilters)

Kokulu gazın debisi ve kirleticinin gaz akımındaki konsantrasyonu, gaz akımına uygulanacak arıtma yönteminin seçilmesinde belirleyici kriterlerdir. Buna göre; atıkgaz debisinin yüksek, kirletici konsantrasyonunun ise düşük olduğu atık gaz akımları için biyofiltreler en ekonomik ve etkin seçenek olup, düşük enerji gereksinimleri ve düşük yatırım maliyetleri nedeniyle kullanımları

da giderek yaygınlaşmaktadır. Amonyak içeren atıkgaz akımları da bu özelliklere son derece uygundur [21].

Biyofiltrasyonda, atık gaz akımlarındaki kirletici gaz bileşenlerini biyolojik olarak ayrıştıran ve kokusuz ürünlere dönüştüren mikroorganizmalar kullanılır. Hava fazı içindeki kirletici gazlar, içinde mikroorganizmaların bulunduğu biyofilm içinde tutulur ve mikroorganizma tarafından nihai parçalanma ürünlerine (su, CO₂, mineral tuzlar, uçucu organik maddeler ve oksitlenebilir inorganik kirleticiler) dönüştürülürler. Mikroorganizmaların oksitleyebildiği bileşenler: hidrojen sülfür (H₂S) ve sülfürlü bileşikler, amonyak (NH₃), uçucu yağ asitleri (VFA'lar), aminler (RNH₂), diğer azotlu bileşikler ve çeşitli uçucu bileşiklerdir. Bu kapsamda biyofiltrelerde; giderim mekanizması 3 aşamalı olup; biyolojik parçalanma, absorpsiyon, ve desorpsiyondan oluşmaktadır [22-24].

Biyofiltreler, yapısal olarak (kapalı ve açık sistemler) ve gaz akış yönüne (yukarı-aşağı akış) göre sınıflandırılır. Kapalı biyofiltreler giriş ve çıkışında gaz akımı kontrolüne imkân sağlarken, açık sistemlerde arıtılmış gazın kontrol imkânı olmayıp, yüzeyden doğru direk havaya verilmektedir. İlk yatırım maliyeti açısından açık biyofiltrelerin maliyeti kapalı olanlardan düşüktür. Bu nedenle hayvan çiftliklerinden kaynaklanan ve koku içeren gazların arıtımında açık sistemler yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Endüstriyel biyofiltre uygulamalarında dolgu malzemesi seçimi önemli olup malzeme seçiminde sırasıyla; nem tutma kabiliyeti, porozite, sorpsiyon özelliği, pH değeri ve maliyet gözönüne alınmaktadır [3,24].

Biyofiltre malzemesi maliyet açısından da önemli bir unsurdur. Maliyeti azaltmak için, mikroorganizma kaynağı (kompost, turba ya da toprak) ve porozite arttırıcı malzeme (odun talaşı) karışımı ile elde edilen dolgu malzemeleri kullanılır. Çoğu açık biyofiltrelerde, kompost ve odun talaşı sırasıyla %20-%80 oranında karıştırılmakta ve 420 kg/m³ yoğunlukta dolgu malzemesi elde edilmektedir. [25].

Literatürde büyükbaş hayvan çiftliklerinden kaynaklanan kokunun giderilmesinde eşit miktarda kompost ve odun talaşından elde edilen karışımın kullanılması önerilmektedir. Sisteme yeterli mikroorganizma ve besi maddesi girişinin sağlanması açısından kompost oranının azaltılması tavsiye edilmeyen bir durumdur. Biyofiltrelerde bekletme süresi de önemli bir parametredir ve

genellikle "boş yatak temas süresi" (BYTS) olarak tanımlanır. BYTS; biyofiltre yatağı dolgu malzemesi hacminin, atık gaz debisine bölünmesi ile bulunur. Besi hayvancılığı ile ilgili yapılan çalışmalarda bekletme süreleri birkaç saniye ile 1 dakika aralığında değişmektedir [26].

Laboratuvar ölçeğinde bir biyofiltre çalışmasında, %65 nem içeriğinde ve nitrifikasyon çamuru ile aşılammış linyitin 40 ppm gibi yüksek amonyak girişlerinde bile giderme veriminin etkilenmediği belirlenmiştir [27].

Nitrifikasyon bakterilerinin giderim verimine etkisinin incelendiği bir çalışmada, bakteri ile aşılammış turbanın aşılammış turbaya göre daha fazla amonyak giderdiği (pH=4,1'de sırasıyla 0,70 ve 0,32 g N/gün/kg kuru turba) görülmüştür. Bu deneylerde bir diğer ilginç husus ise aşılammış biyofiltrede organik azot miktarının <0,1 g değerinden 2 g N/kg kuru turba değerine artmış olmasıdır. Aşılammış dolgu malzemesine, 0,16-0,32 g N/gün kg kuru turba mertebesinde amonyak yüklemeleri yapıldığında, biyofiltrede önemli bir organik azot birikimi tespit edilmemiştir. Nötralizasyonu sağlanmış turbada mikrobiyal kütlelenin gelişiminin daha fazla olması bu durumun oluşmasında etkili olmaktadır [3].

Diğer bir çalışmada, değişken amonyak konsantrasyonlarının kesikli şekilde beslenmesinin (kompost/perlit oranı: 5/1 ve kuru çamur/granüler aktif karbon oranı: 5/1) farklı dolgu içeren biyofiltrelerin verimine etkisi araştırılmıştır. 30-110 mg/m³ aralığında amonyak beslemesi (3,6-60 g/m³.saat yükleme; 0,48-1,6 m³/saat debi ve 18-60 dakikalık BYTS değerleri) ile sürdürülen çalışmada uzun süreli kesintilerin ardından (3 gün ile 1 hafta arası), 18 saat alışma süresini takiben amonyak giderim veriminin %96'dan %99'a yükseldiği ve verimin uzun süre korunduğu görülmüştür. Şok yüklemelerde (6 saat süre ile 500 mg/m³) verimin hızla düştüğü (%70), ancak 5 gün ile 1 haftalık dinlenme periyodunu takiben sistem veriminin %98'e çıkabildiği tespit edilmiştir [17].

Başka bir çalışmada, 210 günlük süreçte kompost ve arıtma çamuru içeren iki ayrı biyofiltrede amonyanın (20-200 mg/m³) arıtımı incelenmiştir. Kompost biyofiltre için 24,9-566 g NH₃/m³.gün, çamur içeren biyofiltre için de 24,9-472 g NH₃/m³.gün şeklinde yükleme yapılmıştır. Bu yüklemeler için arıtma verimleri sırasıyla %97-99 ve %95-99 olmuştur. 110 mg/m³ giriş konsantrasyonu üzerinde ise verim düşmektedir. Nitratın en önemli giderim ürünü olduğu

çalışmada, sisteme herhangi bir besi maddesi ve tampon desteği ise ilave edilmemiştir [28].

Literatürde ağaç yongaları ile doldurulmuş pilot ölçekli biyofiltre domuz çiftliğinden kaynaklanan amonyak emisyonlarının gideriminde kullanılmıştır. 74 günlük işletme süresi boyunca devam eden çalışmada (15 mg/m³ NH₃ giriş konsantrasyonu ve 6-15 dk'lık BYTS değerlerinde) %90-%100 aralığında giderim verimleri elde edilmiştir [13].

Literatürde yapılan çalışmalara ek olarak bu çalışmayla, hayvan yetiştiriciliğinden kaynaklanan amonyak içerikli kokulu gazların kontrolünde kullanılabilen biyofiltrelerin tasarım sürecinde yararlanılacak temel kriterler ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Reaktör Sistemi (Reactor System)

Deney düzeneği, seri bağlanmış birbirine eş iki biyofiltre reaktöründen oluşmaktadır. Reaktörler; pleksiglastan, çap 200 mm, yükseklik 295 mm (hacim:9300 mL, efektif hacim:8500 mL, Yükseklik: 270 mm) olacak şekilde yapılmıştır. Reaktörlerin alt ve üst kısmındaki kapakların sızdırmazlığı, conta ile sağlanmıştır. Kapaklarda, gaz ve sıvı akım giriş ve çıkışı için uygun açıklıklar mevcuttur. Reaktör tabanından 2 cm yukarıya, atık gazın homojen dağılması ve dolgu malzemesine destek olması için alüminyum bir elek yerleştirilmiştir (Şekil.1). BYTS değeri her bir reaktör için 50 saniye olarak seçilmiştir. Havalandırma debisi 10 L/dak olacak şekilde sürdürülmüştür.

2.2. Dolgu Malzemesi (Pack Material)

Dolgu malzemesi için kompost ve ağaç talaşı karışımı seçilmiştir. Kullanılan kompost, İSTAÇ A.Ş.'ye ait kompost tesisi'nden alınmış olup, 2 mm elek altı malzemeden oluşmaktadır. Talaş olarak kaba ağaç talaşı kullanılmıştır. Kompost-talaş karışımı için literatür verileri uyarınca ağırlıkça %50-%50 ile, %90-%10 oranlarında değişen karışımlar yapılmıştır. Bunların arasından optimum karışım olarak “%85 kompost-%15 talaş” oranı seçilmiştir. Kullanılan kompostun ve oluşturulan optimum karışımın bazı özellikleri Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir. Her bir reaktöre

elde edilen karışımdan 1,9 kg malzeme sıkıştırılmadan doldurulmuştur.

2.3. Amonyak Beslemesi (Ammonia Loading)

Amonyak sisteme %1-1,5 amonyak gazı/ azot gazı olacak şekilde verilmiştir. Hâlihazırda iç piyasada bu şekilde bir karışım olmadığı için, değişik pH değerlerinde derişik (%25'lik) amonyum hidroksit ile su karışımlarından havayla sıyrılarak amonyak gazı temin edilmiştir. Bu amaçla, 0,5 L'lik yıkama şişelerinde belirli pH değerlerinde hazırlanan karışımlar, debi kontrollü olarak sağlanan hava ile sıyrılmıştır.



Şekil 1. Seri bağlı reaktör sistemi ve besleme düzeni (Reaktors connected in series and loading layout)

Tablo 2. İSTAÇ Kemerburgaz tesisinden sağlanan kompostun özellikleri (Specification of the compost provided from İSTAÇ kemerburgaz facility)

Parametre	Birim	Değer
pH	-	7,9
TOK	%	19,4
TKN	%	1,2
C/N	-	16,2
Kurşun	mg/kg	266,5
Kadmiyum	mg/kg	3,2
Krom	mg/kg	135,2
Bakır	mg/kg	221,0
Nikel	mg/kg	82,6
Çinko	mg/kg	438,3
Cıva	mg/kg	1,1

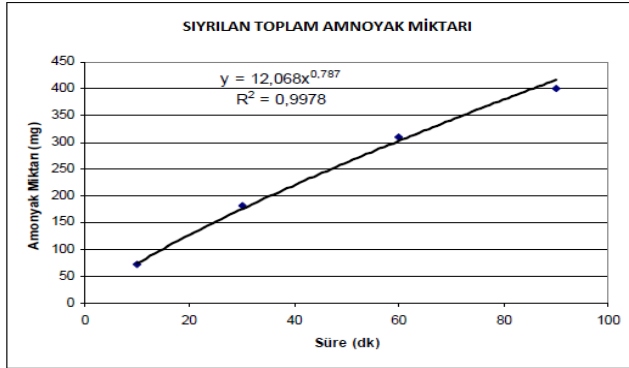
Sıyrılan amonyağı taşıyan gaz karışımı reaktörlere beslenmiştir. Bu tarz besleme kesikli şekilde ve sıyrma işleminden dolayı düşük bir konsantrasyondan gittikçe artan konsantrasyonlara doğru yapılmıştır. Çözeltiden gaz fazına geçebilecek amonyağın hesabı Henry Kanunu yardımıyla yapılmıştır. Henry kanunu;

$$P_A = H \cdot X_A \quad (1)$$

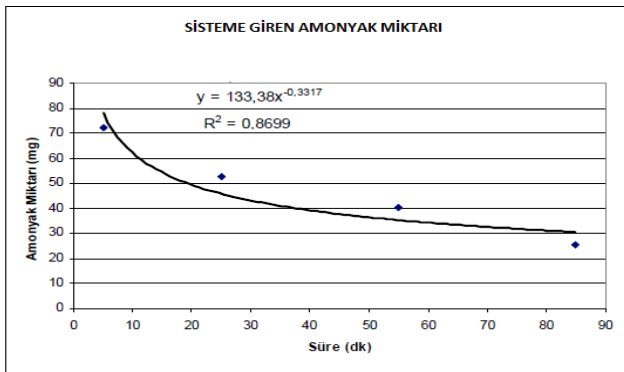
Denklemi ile verilir. Burada; P_A gaz fazındaki amonyak kısmi basıncını (atm veya mm Hg), X_A

ise çözeltilerde amonyak mol konsantrasyonu (mol/L), H'de Henry Kanunu sabitini (Amonyak için 25 °C'de 0,01695 atm/mol) ifade etmektedir. [7].

Hava ile sıyırma işlemi; 0,5 L'lik yıkama şişesindeki amonyak/su çözeltisi yüzeyinden ve çözelti içine batırılarak iki değişik yöntemle yapılmıştır. Elde edilen amonyak gazı, seri bağlı poröz taş dağıtıcılı 2 adet absorplama şişesinde tutulmuştur. Absorplama şişelerine 0,1L 0,1 N borik asit çözeltisi ilave edilmiştir. Sıyırma işleminin gerçekleştirildiği 1-2 saatlik sürede 10'ar dakikada bir absorplama işlemi yapılmıştır. Sıyırma hava debisi 10, 20 ve 30 L/dak olacak şekilde ayarlanmıştır. Absorplama şişelerinde tutulan amonyak, 0,02 N H₂SO₄ çözeltisi ile titre edilerek miktar tespit edilmiştir [29]. Amonyak sıyırmasında beslenen (hava+amonyak) karışımının konsantrasyonu ve reaktörlere giren toplam amonyak miktarının zamanla değişimine örnek olmak üzere, pH 11,19 değerinde yapılan çalışma Şekil 2'de verilmiştir. Çeşitli pH değerlerine sahip amonyak çözeltileri kullanılarak yapılan sıyırma çalışmalarında teorik ve ölçülen değerlerin uyumluluğu belirlenmiş ve örnek oluşturmak üzere Tablo 4'te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 2. Sıyırma sisteminden elde edilen (a) ve biyofiltreye beslenen amonyak (b) miktarları Ammonia values obtained from stripping system (a) and loaded to biofilters (b)

Tablo 4. Teorik ve deneysel amonyak sıyırma değerleri (Theoretical and experimental ammonia stripping values)

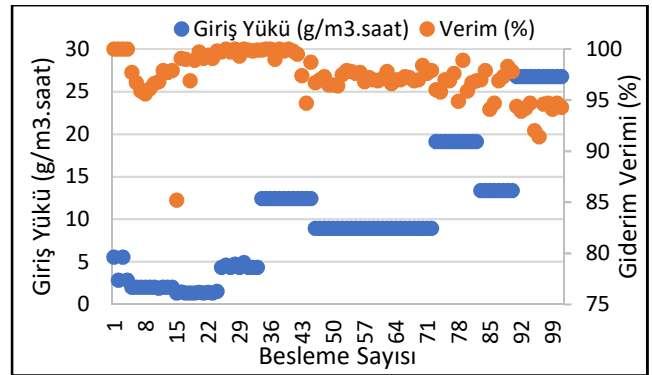
Teorik NH ₃ miktarı, mg	Ölçülen NH ₃ miktarı, mg	Sıyırma Verimi, %
69,9	46	65,8
196,3	178,3	90,8
467,5	401,5	85,9

3. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Ters akımlı, ardışık reaktörlerde sentetik amonyak gazı 40-350 mg/m³ konsantrasyon aralığında beslenmiş ve reaktörlerdeki biyolojik reaksiyonların ürünleri olan NO₂⁻, NO₃⁻, TKN ve kalan NH₄⁺ azot türleri arasındaki dönüşüm, reaktörlerdeki dolgu malzemesinde yapılan deneylerle tespit edilmiştir.

3.1. Amonyak Giderimi (Ammonia Removal)

Çalışma, aklimasyon dönemi dahil, 130 günlük süre içinde 1,32-27 g NH₃/m³.saat aralığında 8 farklı yükte yapılmıştır. Bu yükler sırasıyla 1,32-2,00-4,48-8,92-12,44-13,38-19,12-26,76 g NH₃/m³.saat olmuştur. Ölçüm sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Biyofiltrede giriş amonyak yükleri ve giderim verimi ilişkisi (Input ammonia load and removal efficiency relation)

Reaktörlerde nem oranı % 40-60 aralığında değişmiştir. Sistem genellikle mezofilik (15-26 °C) aralıkta çalıştırılmış olup, değerler amonyak giderimi için gerekli olan optimum aralıkta kalmıştır. Deneysel çalışma esnasında biyofiltre sisteminin ikinci reaktörünün çıkışı, içlerinde 100'er mL 0,1 N borik asit çözeltisi bulunan seri bağlı 2 adet yıkama şişesi içinden gün boyunca geçirilerek amonyak gazı absorbe edilmiş ve 0,02 N H₂SO₄ çözeltisi ile titre edilerek günlük ortalama verimin belirlenmesinde kullanılmıştır. Çalışma 42 gün boyunca 10 L/dak'lık debi ve farklı 3 amonyak yüklemesiyle, takip eden 58 gün

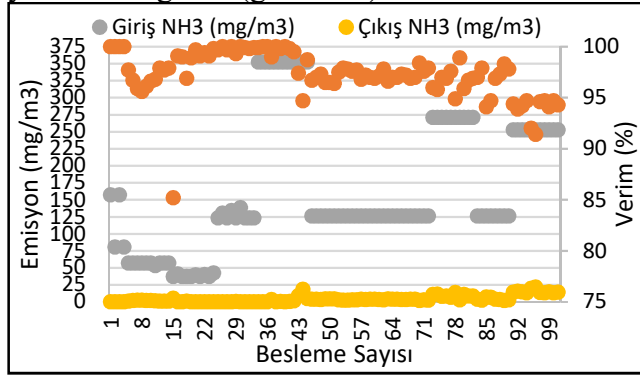
boyunca 20 L/dak'lık debi ve tek yüklemeye, 21 gün boyunca ise 30 L/dak'lık debi ve farklı 2 amonyak yüklemesiyle tamamlanmış olup, BYTS biyofiltreler için literatürde en çok önerilen 17-51 saniye arasında değiştirilmiştir. Biyofiltrede amonyak yüklemesi ile giderme veriminin değişimi Şekil 4'de verilmiştir.

Çalışma periyodu boyunca ortalama giderme verimi % 97,2±1,76 olarak bulunmuştur. Bu değer literatürde verilen %95-99 aralığı ile uyumludur. Maksimum ve minimum verimler %99,8 ve %93,9 olarak belirlenmiştir. Genel olarak NH₃ yükü arttırıldığında verim azalmaktadır. Bu ilişkinin denklemi;

$$y = -0,1337x + 98,712 \quad (2)$$

(R² = 0,4471) olarak bulunmuştur.

Burada y terimi % giderim verimini, x terimi ise yükleme değerini (g/m³.saat) ifade etmektedir.



Şekil 4. 10, 20 ve 30 L/dakika debide giriş ve çıkış amonyak emisyonları ve verimin değişimi (Input and output ammonia emissions and removal efficiency relation for 10,20, 30 L/min. flows)

Bu ifade, biyofiltrede inhibisyon etkisi sınırlarına kadar geçerlidir. Kompost materyalinin biyofiltrasyondan önce ve 42 gün sonraki özelliklerinden bazıları Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Çalışmanın başlangıç ve sonundaki dolgu malzemesi özelliklerinin karşılaştırması (Comparison of pack material properties at beginning and end of experiment)

Parametre	Birim	Çalışma başlangıcı	42 gün sonra	
			Karışım	Reaktör 1	Reaktör 2
pH*	-	7,38	7,44	7,46
Elektriksel İletkenlik*	µs/cm	4440	2560	2840
Su Muhtevası*	%	27,2	55	56
Katı Madde	(% katı)	72,8	45,0	44,0
TKN	g/kg*	12,92	18,11	16,03
TKN	%	1,29	1,81	1,60
NH ₄ -N	mg/kg*	38,0	2406,44	251,49
KOI, **	g/kg kuru mad	0,13	0,12	0,10

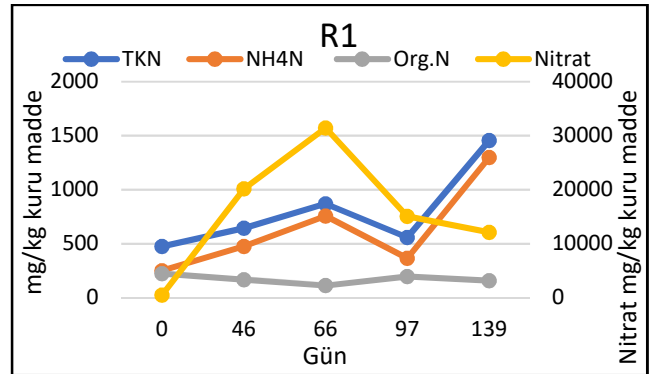
* 1 birim karışım+ 5 birim su, ** 1 birim karışım+ 20 birim su

Tablodan görüldüğü üzere malzemenin pH'ında tamponlama kapasitesinden dolayı önemli bir değişim görülmemekle beraber, elektriksel iletkenliğinde bir azalma söz konusu olmuştur. Organik madde konsantrasyonunda herhangi bir değişim gözlenmezken, yüksek amonyak giderimi sonucu NH₄-N konsantrasyonunda büyük bir artış gözlenmiştir. Buna göre organik azot miktarında %3 dolayında artış gerçekleşmiştir.

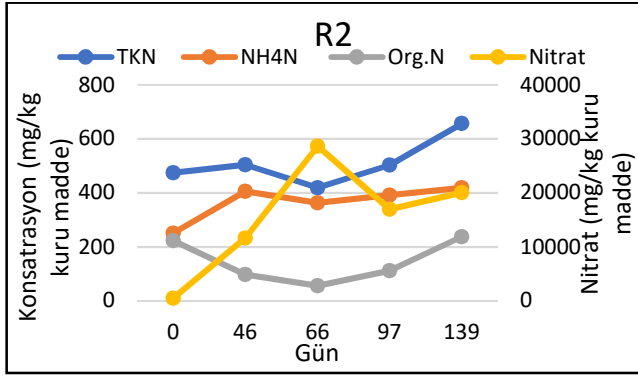
3.2. Azot Türlerinin Dönüşümü (Transformation of Nitrogen Forms)

Çalışmada ayrıca biyofiltrede dolgu malzemesi olan kompost materyalinden, karakteristik amonyak yüklemelerinde, kararlı duruma ulaşıldıktan sonra, her iki filtrenin girişinden alınan numuneler üzerinde azotun dönüşüm ürünleri incelenmiştir. Biyoreaktörlerde azot türlerinin değişiminin belirlenmesi için, reaktör 1 (R1) ve reaktör 2 (R2)'den alınmış dolgu malzemelerinin, distile su ile katı/sıvı oranı =1/20 olacak şekilde yapılan ekstraksiyonundan elde edilen filtre edilmiş suda iyon analizörle nitrit ve nitrat iyonları ve ıslak kimyasal analizlerle ise TKN ve NH₄-N'u parametreleri konsantrasyonları belirlenmiştir. Bu parametrelerin değişimi Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir.

Sonuçta, aynı amonyak yüklemelerinde ilk sırada yer alan R1'de genellikle amonyağın önemli kısmının dönüşümünün gerçekleştiği ve dönüşüm ürününün beklediği gibi nitrat azotu şeklinde olduğu bulunmuştur. Organik azot bakımından R1'de sabit bir seviyeye karşılık R2'de başlangıçta oldukça yüksek bir konsantrasyondan gittikçe azalan değerler elde edilmiştir. Nitrat azotunun azalmasına karşılık organik azot konsantrasyonunda artış tespit edilmiştir.



Şekil 6. Reaktör 1'de azot türlerinin değişimi (Variations of nitrogen species in reactor 1)



Şekil 7. Reaktör 2'de azot türlerinin değişimi (Variations of nitrogen species in reactor 2)

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Çalışmada hayvan çiftliklerinden ileri gelen kokulu atık gazların ekonomik bir yöntem olan biyofiltrelerle arıtılmasına ilişkin deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, hayvan yetiştiriciliğinde en önemli koku bileşenlerinden biri olan amonyakın, farklı yükleme oranlarında biyolojik olarak giderimini etkileyen etmenler laboratuvar ölçekli bir reaktörde vasıtasıyla incelenmiştir. Çalışma sonuçlarında, sektörde amonyak içeren kokulu atıkgazların kontrolünde kullanılabilecek biyofiltrelerin tasarımında yararlanılacak temel kriterler ortaya konmuştur.

Çalışmada, silindirik, seri bağlı ardışık iki adet biofiltre reaktörü kullanılmıştır. Biyofiltrede dolgu olarak kompost ve ağaç talaşı karışımı sırasıyla %85-%15 oranında kullanılmıştır. Amonyak beslemesi için, sentetik olarak sıyırma işlemi ile hazırlanan, %1-1,5 amonyak/azot gazı karışımları kullanılmıştır. Ters akımlı, ardışık reaktörlerde sentetik amonyak gazı 40-350 mg/m³ konsantrasyon aralığında, 130 günlük periyot içinde 1,32 -27 g NH₃/m³.saat olmak üzere 8 farklı yükte yapılmıştır.

Çalışmanın başlangıcı ile bitiminde, dolgu malzemesinden alınan örnekler analiz edilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde; pH değerinin kompost malzemesinin tamponlama kapasitesi dolayısı ile çok fazla değişiklik göstermediği, eluatlar üzerinden yapılan analizlerde TKN azotunda yükselme gözlemlendiği, amonyak azotunda ise her iki reaktörde NH₃ gideriminden dolayı önemli artışlar kaydedildiği tespit edilmiştir. Değişik amonyak giriş konsantrasyonlarında giderme verimi % 97,2±1,76 olarak bulunmuştur. Genel olarak amonyak giriş yükü artırıldığında verim azalmıştır.



Çalışmada ayrıca biyofiltrede dolgu malzemesi olan kompost materyalinden, karakteristik amonyak yüklemelerinde, kararlı konuma ulaşıldıktan sonra, her iki filtrenin girişinden olmak üzere alınan numunelerde azot dönüşüm ürünleri incelenmiş ve aynı amonyak yüklemelerinde ilk sırada yer alan R1'de genellikle amonyakın önemli kısmının dönüşümünün gerçekleştiği ve dönüşüm ürününün beklendiği gibi nitrat azotu şeklinde olduğu bulunmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. I. Showqi, F. A Lone, M. Ashraf, M. A. Mehmood, and A. Rashid, "Biofilters in Mitigation of Odour Pollution - A Review," *Nature Environment and Pollution Technology*, vol. 15, pp.1177-1185, 2016.
- [2]. V. Blanes-Vidal, J. Baelum, E. S. Nadimi, P. Lofstrom, L. P. Christensen, "Chronic exposure to odorous chemicals in residential areas and effects on human psychosocial health, Dose-response relationships," *Science of The Total Environment*, vol. 490, pp.545-554, 2014.
- [3]. Ö. Uyar "Biyofiltrelerle Amonyak Emisyonlarının Kontrolü," Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2007.
- [4]. K. Alp, Ö. Uyar, A. Hanedar, E. Avşar, "Amonyak İçeren Atıkgazların Biyofiltrelerde Arıtılması," *İ.T.Ü. 12. Endüstriyel Kirlenme Kontrolü Sempozyumu*, s.103-112, 2010.
- [5]. G. K. Kafle, L. Chen, H. Neibling, B. B. He, "Field evaluation of wood bark-based down-flow biofilters for mitigation of odor, ammonia, and hydrogen sulfide emissions from confined swine nursery barns," *Journal of Environmental Management*, vol. 147, pp. 164-174, 2015.
- [6]. P. Baltrenasa, A. Miseviciusa, K. Macaitisa, R. Tekorieneb, "Experimental research of odours arising during the process of biofiltration," *Energy Procedia*, vol. 72, pp 64-70, 2015.
- [7]. M. Appl, "Ammonia:Principles and industrial practice,"New Jersey: Wiley-VCH, 1999.

- [8]. W. M. Grant, C. C. Thomas, "Ammonia. In: Toxicology of the eye. 2nd edition," Illinois: Springfield, 1974.
- [9]. S. S. Schiffman, B. W. Auvermann, R. W. Bottcher, "Health Effects of Aerial Emissions from animal production and waste management systems,". Technical Note, *White Paper Summaries*, pp. 1-3, 2001.
- [10]. J. Pearson, G. R. Stewart, "The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants," *New Phytologist*, vol. 125, pp. 283–305, 1993.
- [11]. T. Kurvits, T. Marta, "Agricultural NH₃, and NO emissions in Canada. *Environmental Pollution*," vol. 102, pp. 187-194, 1998.
- [12]. C. M. C. Peet-Schwering, A. J. A. Aarnink, H. B. Rom, J. Y. Dourmad, "Ammonia emissions from pig houses in the Netherlands, Denmark and France,". *Livestock Production Science*, vol. 58, no.1-3, pp. 265-269, 1999.
- [13]. E. Dumont, L. Hamon, S. Lagadec, P. Landrain, B. Landrain, Y. Andrès, "NH₃ biofiltration of piggery air," *Journal of Environmental Management*, vol. 140, pp. 26-32, 2014.
- [14]. K. Louhelainen, J. Kangas, A. Veijen, P. Viilos, "Effect of in situ composting on reducing offensive odors and volatile organic compounds in Swineries," *AIHAJ*, vol. 62, pp. 159-167, 2001.
- [15]. S. B. Shah, T. J. Basden, D. K. Bhumbla, "Bench-scale biofilter for removing ammonia from poultry house exhaust," *Journal of Environmental Science and Health, Part B-Pesticides, Food Contaminants and Agricultural Wastes*, vol. B38, pp. 89-101, 2003.
- [16]. A. Armeen, "Biofiltration of odour control in livestock facilities," Ph.D Thesis, University of Alberta, 2006.
- [17]. Y. X. Chen, J. Yin, K. X. Wang, S. Fang, "Effects of periods of nonuse and fluctuating ammonia concentration on biofilter performance," *Journal of Environmental science and health part A-Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, vol. A39, pp. 2447-2463, 2004.
- [18]. E. Smet, H. Van Langenhove, K. Maes, "Abatement of high concentrated ammonia loaded waste gases in compost biofilters," *Water, Air and Soil Pollution*, vol. 119, pp. 177-190, 2000.
- [19]. N. J. Kim, M. Hirai, M. Shoda, "Comparison of organic and inorganic packing materials in the removal of ammonia gas in biofilters," *Journal of Hazardous Materials*, vol. B72, pp.77-90, 2000.
- [20]. E. Pagans, X. Font, A. Sanchez, "Biofiltration for ammonia removal from composting exhaust gases," *Chemical Engineering Journal*, vol. 113, pp. 105-110, 2005.
- [21]. K. A. Rabbania, W. Charlesa, A. Kayaalp, R. Cord-Ruwischa, G. Hoa, "Pilot-scale biofilter for the simultaneous removal of hydrogen sulphide and ammonia at a wastewater treatment plant," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 107, pp. 1–10, 2016.
- [22]. H. L. Bohn, "Control of VOC emissions from waste management facilities, Comments," *J. Environ. Eng.*, vol. 116, pp. 1002-1004, 1990.
- [23]. H. L. Bohn, "Consider biofiltration for decontaminating gases," *Chem. Eng. Prog.*, vol. 88, pp.34-40, 1992.
- [24]. R. F. Vieira, D. Lopes, I. R. Baptista, S. A. Figueiredo, V. F. Domingues, J. Vaz, H. Varela, R. F. Jorge, O. M. Freitas, and C. Delerue-Matos, "Biofiltration using natural materials from Portuguese woods for odour removal in a municipal waste management plant," *Sustainable Development*, vol. 2, pp. 717-727, 2015.
- [25]. J. S. Devanny, M. A. Deshusses, T. S. Webster, "Biofiltration for air pollution control," Florida: CRC Lewis Publishers, 1999.
- [26]. R. E. Nicolai, "Biofiltration of livestock facility exhaust air," Ph.D Thesis, University of Minnesota, 2002.
- [27]. N. Furusawa, I. Togashi, M. Hirai, M. Shoda, H. Kubota, "Removal of hydrogen sulfide by a biofilter with fibrous peat," *Journal of Fermentation Technology*, vol. 62, pp. 589-594, 1984.

- [28]. Y. X. Chen, J. Yin, K. X. Wang, “Long term operation of biofilters for biological removal of ammonia,” *Chemosphere*, vol. 58, pp. 1023-1030, 2005.
- [29]. D. A. Eaton, L. S. Clesceri, E. W. Rice, A. E. Greenberg, “Standard Methods for the examination of water and wastewater 21st Ed.,” Missouri: American Public Ass., 2005.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 23-08-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 15-01-2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.335832	

Çoklu modül destekli enerji etkin akıllı kontrol sistemi

Doğan Başaran¹ Büşra Karanfil² Burak Tüysüz^{*3}

ÖZ

Akıllı kontrol sistemleri, yönetimi altında olan birimlerin kontrolünü kullanıcı etkisi olmaksızın gerçekleştiren sistemlerdir. Bu işlemler çeşitli yazılımlar aracılığıyla donanımların kontrol edilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Günümüzde kullanılan akıllı kontrol sistemleri, yeni binalarda sıklıkla uygulama alanı bulmakla birlikte, görevleri genellikle konfor veya tasarruf amaçlı olmak üzere farklılıklar göstermektedir. Hala gelişim evresinde olan bu sistemler sayesinde günlük hayatta karşılaşılan birçok probleme maliyet etkin veya kullanıcı yükünü azaltan çözümler üretilebilmektedir. Bu çalışmada akıllı kontrol sistemlerinin kullanım alanlarının genişletilmesi ve bu sistemlerin faydalarının artırılması için çoklu modül destekli bir akıllı kontrol sistemi geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem kullanıcıya birden fazla alanın aydınlatma, havalandırma ve iklimlendirme kontrolü ve belirli olumsuz sağlık koşullarında devreye girerek erken uyarı imkanı sağlamaktadır. Bunlara ek olarak, operatörün geliştirilen grafik ara yüzünü kullanarak tüm modüllere hakim olması ve verileri kontrol edebilmesi de sağlanmıştır. Bu makalede geliştirilen çoklu modül destekli akıllı kontrol sisteminin donanım ve yazılım bileşenleri tanıtılmış, operasyon aşamaları anlatılmış ve sistem ile yapılan testlerde etkileri gözlemlenmiştir. Buna göre sistemin kullanılmasıyla 126 m³ hacimli ve günde ortalama 456,89 W/h enerji tüketilen bir çalışma ortamında konfordan ödün vermeden enerjiden günde yaklaşık %35,81 tasarruf sağlandığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: sağlık, mesaj kuyruk telemetri taşıma, enerji verimliliği, akıllı kontrol sistemi

A multi-module supported energy efficient intelligent control system

ABSTRACT

Systems that perform control of units under management without user influence are called intelligent control systems. These operations are performed by controlling the hardware through various software. Today's intelligent control systems often find applications in new buildings, but their tasks often differ, for comfort or savings. Thanks to these systems, which are still in the developmental stage, many problems encountered in daily life can be produced cost effective or user reducing solutions. In this study, a multi-module intelligent control system was developed to extend the usage areas of intelligent control systems

¹ Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği, dogan_basaran15@erdogan.edu.tr

² Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, busra_karanfil16@erdogan.edu.tr

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

³ Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, burak.tuysuz@erdogan.edu.tr

and to increase their utility. The developed system provides the user with early warning by switching on lighting, ventilation and air conditioning control of several areas and in certain adverse health conditions. In addition, the operator has been able to control all the modules and control the data by using the developed graphical interface. The hardware and software components of the intelligent control system with multi module support developed in this article are introduced, the operation steps are explained and the effects are observed in the tests made with the system. According to this system, it is determined that energy saving of approximately 35.81% per day is achieved without compromising the comfort in a working environment with a volume of 126 m³ and an average energy consumption of 456.89 W / h per day.

Keywords: health, mqtt, energy efficiency, intelligent control system

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji ihtiyacının her geçen gün artmasıyla birlikte enerji tüketiminde verimin önemi de artmaktadır. Binalarda verimli enerji tüketimini sağlamak için ise yalıtım malzemeleri, merkezi ısıtma sistemleri ve termostatik vana kullanımı gibi donanımsal uygulamalar devam etmektedir [1]. Fakat kullanılan cihazların otomatik olarak kontrol edilemeyişi birtakım problemlere yol açmaktadır. Gelişen teknolojiyle beraber enerjinin verimli tüketiminde kontrol sistemleri önemli rol oynamaya başlamıştır [2]. Böylece, kullanıcının bulunmadığı ortamlarda çalışan aydınlatma ve iklimlendirme cihazlarının harcadığı güçte tasarruf sağlanabilmekte ve hatalı kullanım nedeniyle cihazların daha çok enerji tüketerek ortam koşullarını verimsizleştirilmesi engellenebilmektedir. Aynı zamanda bu sistemlerin insan sağlığı ve çevre için tehdit içermiyor olmaları ve ihtiyaçlara göre kolaylıkla tasarlanabilmeleri gerekmektedir. Akıllı kontrol sistemleri, bu ihtiyacı gidermek için en uygun ve kullanılabilir yöntemler arasında gösterilebilirler. Bu sistemler bir yazılım ve bu yazılıma bağlı çalışan donanım araçlarıyla kullanıcıların yerine denetim ve komut/karar mekanizmalarını yerine getirerek enerji tüketiminin kontrol edilmesini sağlayan sistemler olarak tanımlanabilir.

Son yıllarda hızla gelişen teknoloji ile birlikte akıllı kontrol sistemlerinin kullanımı hızla yaygınlaşmış ve birçok farklı sistem geliştirilmiştir [3]. Geliştirilen sistemler şebeke merkezli ve kullanıcı merkezli olarak ikiye ayrılmaktadır. Şebeke merkezli sistemlerde kullanıcının tüketim alışkanlıklarına göre sistem tarafından fiyatlandırma bazında tasarruf sağlanmaktadır [4]. Bu tarz sistemler aktif kullanım yapılan zaman aralığı ve tüketim miktarı gibi parametrelerden faydalanmaktadır. Conejo

vd. kullanıcıların tüketim miktarlarını ve bu tüketimin zamana bağlı sınıflandırmasını değerlendiren, bu değerlendirmelere göre enerji maliyetlerinin düzenlenmesini sağlayan bir sistem geliştirmişlerdir. Tasarladıkları sistemle küçük bir işletme veya bir evde enerji maliyetinden tasarruf sağlandığını öne sürmüşlerdir [5]. Şebeke merkezli sistemlerin genel olarak tasarruf açısından uygun fakat verimlilik anlamında yetersiz oldukları görülmektedir. Kullanıcı merkezli sistemlerde ise tüketicilerin iklimlendirme ve aydınlatma cihazları ile gerçekleştirmiş oldukları tüketime doğrudan etki edilmektedir. Bu tür sistemlerde daha çok GSM tabanlı veya internet üzerinden kontrol imkanı veren uygulamalar kullanılmaktadır. Han vd. yaptıkları çalışmada akıllı evler için Zigbee modülü ile veri iletişimi sağlayan bir sistem geliştirmiştir [6]. Geliştirilen sistemde IEEE 802.15.4 protokolü kullanılarak mevcut cihazların kontrolünü gerçekleştirebilen bir akıllı ev uygulaması geliştirilmiştir. Bu uygulamanın enerji tüketimine olumlu yönde etki ettiği gözlemlenmiş ancak kullanılan donanımların maliyetinin sisteme bir yük getirerek kazançları azalttığı görülmüştür. Aynı zamanda kullanılan Zigbee modülü ile ortamdaki elektromanyetik kirlilik de artırılmaktadır [7]. Mevcut GSM tabanlı uygulamalarda ise iklimlendirme, aydınlatma ve beyaz eşya gibi cihazlarının kullanıcı merkezli olarak uzaktan kontrolü sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra kamera destekli sistemler geliştirilerek güvenlik problemlerine karşı önlem alınmaya çalışılmaktadır. İnal vd. tarafından geliştirilen bir akıllı ev uygulaması kısa mesaj yoluyla cihazların kontrolünün sağlanabildiği göstermiştir [8]. Fakat bu yaklaşımda da GSM modem araçlarının maliyeti arttırdığı görülmüştür. Ayrıca sistem kullanıcıdan kısa mesaj yoluyla bir komut beklemekte olup gerçek zamanlı verileri sadece gözlem amacıyla kullanılmaktadır. Bu durumda geliştirilen bu uygulama kullanıcıya uzaktan

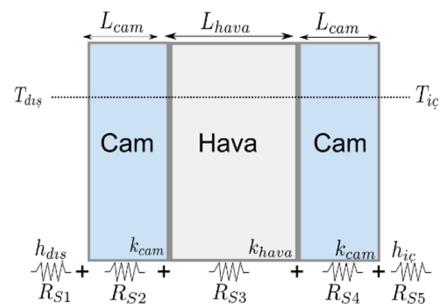
kontrol imkanı sunmakta ancak kullanıcının kontrol yükünü azaltmamaktadır. Ayrıca geliştirilen uygulamanın tek bir alan için kontrol sağlaması da etkisini azaltmaktadır. Özerdem vd. tarafından geliştirilen bir mobil uygulamada ise, ortamdaki kapıların açık veya kapalı olma durumları kontrol edilmekte, en son alınan sıcaklık verileri kullanıcıya aktarılmakta, ortamda hareket algılandığı durumlarda ise kullanıcıya bildirim gönderilmekte ve aynı uygulamada ortamda yangın olup olmadığı hakkında bilgi sağlanmaktadır [9]. İklimlendirme ve aydınlatma cihazları üzerinde kontrolü bulunmayan bu uygulamanın sadece sınırlı gözlem ve uyarı özelliklerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Literatürde bulunan birçok benzer uygulamadaki eksiklikler ve sistem kazancını düşüren olumsuzluklar irdelenerek bu çalışmada binalarda çoklu alan kontrolünü, enerji verimliliğini ve ideal ortam şartlarını sağlamak için çoklu modül destekli bir akıllı kontrol sistemi olan Bileşik Akıllı Kontrol Sistemi (BAKS) geliştirilmiştir. Geliştirilen sistemle, birden fazla alanda enerji verimliliği sağlamak ve bunun yanında ortam koşullarını uygun seviyelerde tutmak hedeflenmiştir. Ayrıca zehirli gaz salınımına yol açan yangın, doğal gaz kaçağı gibi durumlarda da erken uyarı sağlanmıştır. Çoklu modül desteği, sistemin sağladığı en önemli artılarından. Bu özellik sayesinde tek merkezden yönetilen binalarda tüm birimlerde enerji tüketiminin takip edilmesi, verimli tüketim yapılması ve ortam şartlarının takip edilerek uygun değerlerde tutulması sağlanmaktadır. Böylece sistemin verimliliği artırılarak maliyeti de düşürülmektedir. Bu doğrultuda farklı işletim sistemlerinde uyumlu şekilde çalışabilecek bir kontrol sistemi yazılımı da Python programlama dilinde QT Kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen BAKS sisteminin testleri yapılarak enerji verimliliğine olan etkisi incelenmiştir.

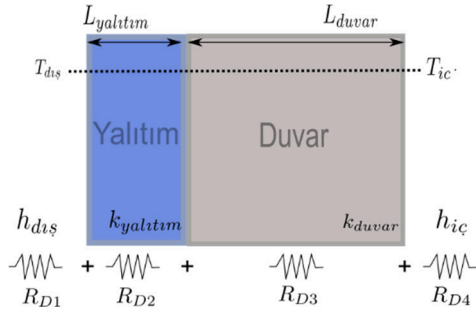
Bu çalışmanın 2. bölümünde iklimlendirme cihazlarının doğru kullanımı için bina kabuğundaki ısı transfer hızının hesaplanmasında kullanılan modeller ve oluşturulan denklemler verilmiştir. 3. bölümünde donanım ve yazılım alt başlıkları altında geliştirilen BAKS sisteminin yapısı açıklanmıştır. 4. bölümünde tasarlanan sistem ile gerçekleştirilen uygulamaya yer verilmiştir. Son bölümde ise denemeler sonucunda elde edilen verilerin sonuçları incelenmiş ve BAKS sisteminin verimliliği tartışılmıştır.

2. ISI TRANSFER HIZININ HESAPLANMASI (HEAT TRANSFER RATE CALCULATION)

Geliştirilen BAKS sisteminde ortamda bulunan iklimlendirme cihazının kontrolü için gerekli sıcaklık hesaplamalarının yapılması gerekmektedir. Ancak normal koşullarda iç ortam sıcaklığının hiçbir zaman sabit olmayıp, dış ortamla ısı transferi halinde olmasının sistemin karar mekanizmasında hatalara sebep olabileceği düşünülmüştür. Bu sebeple, bina kabuğundaki dolu ve saydam alanların ısı transfer hızlarının hesaplanması için Şekil 1 ve Şekil 2’de gösterilen saydam yüzeyler ve dolgu alanlar için oluşturulan modeller kullanılmıştır. Şekil 1’de çift camlı bir saydam yüzeyin modeli verilmiştir. Bu modelde R_{S1} dış alan, R_{S5} ise iç alanı gösteren ısı dirençlerdir. Ayrıca R_{S2} ve R_{S4} cam yüzeyin ısı direncini, R_{S3} ise iki cam arasındaki hava boşluğunun ısı direncini göstermektedir. Şekil 2’de gösterilen dolgu alan modelinde ise R_{D1} ve R_{D4} sırasıyla iç alan ve dış alan ısı dirençlerini ifade etmektedir. Bunlara ek olarak, R_{D2} , duvar yüzeyine uygulanan yalıtım materyali sebebiyle oluşan ısı direnci, R_{D3} ise duvarın oluşturduğu ısı direnci belirtmektedir. Gösterilen ısı direnç değerleri Eş. 1 ve Eş. 2 kullanılarak hesaplanmıştır [10]. Burada; L kabuk elemanının kalınlığını, h iç ve dış havanın ısısal taşınım katsayısını, k kabuk elemanlarının ısı iletim katsayısını, A ise kabuk elemanının yüzey alanlarını ifade etmektedir. Hesaplanan ısı direnç değerlerinin Şekil 1 ve Şekil 2’de verilen modellerde gösterildiği gibi toplanmasıyla farklı modeller için toplam ısı direnç değeri olan $R_{toplama}$ elde edilmektedir.



Şekil 1. Saydam yüzeylerin ısı transfer hızının ısı dirençler kullanılarak modellenmesi. (Modeling of heat transfer rate of transparent surfaces using thermal resistances.)



Şekil 2. Dolu alanlarda ısı transfer hızının ısı dirençleri kullanılarak modellenmesi. (Modeling of heat transfer rate in solid areas using thermal resistances.)

$$R_{S1} = \frac{1}{h_{dış} * A}, R_{S2} = \frac{L_{cam}}{k_{cam} * A}, R_{S3} = \frac{L_{hava}}{k_{hava} * A}, R_{S4} = \frac{L_{cam}}{k_{cam} * A},$$

$$R_{S5} = \frac{1}{h_{iç} * A} \quad (1)$$

$$R_{D1} = \frac{1}{h_{dış} * A}, R_{D2} = \frac{L_{yalıtım}}{k_{yalıtım} * A}, R_{D3} = \frac{L_{duvar}}{k_{duvar} * A}, R_{D4} = \frac{1}{h_{iç} * A} \quad (2)$$

İç-dış sıcaklık farkının fazla olması iç ortamın istenmeyen şekilde ısı kaybetmesine veya kazanmasına sebep olmaktadır. Ortam kabuğuna ait ısı transfer hız değerini ifade eden Q değeri, Eş. 3'e verilmiştir. Dış sıcaklık ve iç sıcaklık farkının toplam ısı direnç değerine bölünmesiyle elde edilen bu değer ortamın ısı kaybı veya kazanç hızını göstermektedir. Toplam ısı direncin artması, Q değerini düşmesine sebep olacak ve bu ısı kaybının az olduğunu ifade edecektir. Günümüzde istenmeyen ısı kaybı ve kazançlarını engellemek için yapılan yalıtım ve ısıcam kullanımı gibi işlemler bu ısı transfer hızını azaltmak için gerçekleştirilmektedir [11].

$$Q = T_{dış} - T_{iç} / R_{toplant} \quad (3)$$

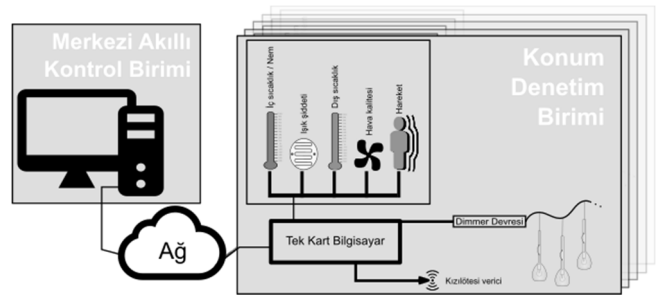
Hesaplamalarda ısı transfer hızının kullanılmasının en önemli getirisi, iç ortamın uygun sıcaklıkta bulunduğu durumlarda kayıp veya kazanç hızına bağlı olarak iklimlendirme cihazı için doğru soğutma veya ısıtma seviyesinin ve hızının belirlenmesini sağlamaktır. İç ortam, uygun olarak belirlenen sıcaklık değerlerini sağladığında ısı transfer hızı belirlenen sınır değerden yüksek ise ortamda ani soğuma veya ısınmalar olacaktır. Buna göre iklimlendirme cihazının ani değişikliklere göre tepki süresi ayarlanabilmektedir.

3. SİSTEM TASARIMI (SYSTEM DESIGN)

Geliştirilen BAKS sistemi tek merkezden yönetilen binalarda enerji performansını iyileştirmeyi ve bina içindeki insanların sağlığı için ortam koşullarını en uygun seviyede tutmayı amaçlamaktadır. BAKS sistemi, merkezi akıllı kontrol birimi ve konum denetim birimi olmak üzere iki farklı donanım biriminden oluşmaktadır. Konum denetim birimi, kontrolü sağlanması planlanan ortamlara yerleştirilmekte ve bu konumlardan eşzamanlı veri akışını sağlamaktadır. Merkezi akıllı kontrol birimi ise tüm konum denetim cihazlarından gelen verilerin izlenmesi ve değerlendirmesini sağlayan, gelen verilere göre de kontrol sinyallerini oluşturup konum denetim cihazlarına ileten birimdir. Bu amaç doğrultusunda tasarlanan sistemin tasarım aşamaları ve işleyişi bu bölümde donanım bileşenleri ve yazılım adında iki başlık altında incelenmiştir.

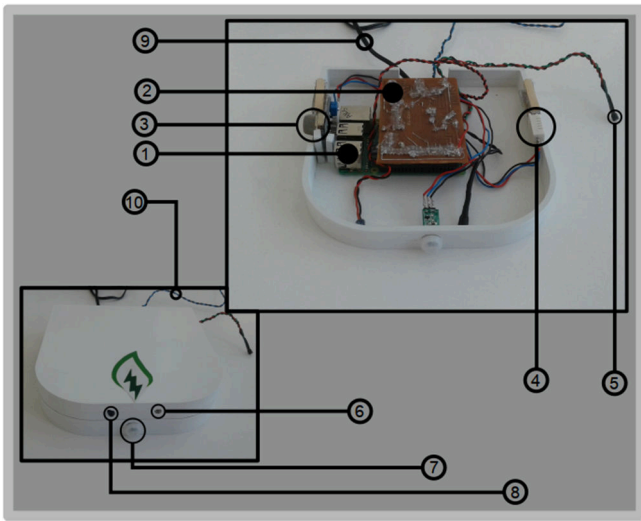
3.1. Donanım Bileşenleri (Hardware Components)

Merkezi akıllı kontrol birimi, konum denetim birimlerine bağlı sensör ağı yardımıyla gerçek zamanlı verilere erişmektedir. Merkezi akıllı kontrol birimi ve konum denetim birimlerinin bağlantıları Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekilden de görülebileceği gibi konum denetim birimleri; tek kart bilgisayar donanımı, buna bağlı 5 farklı sensör, kızılötesi verici ve bir dimmer devresinden oluşmaktadır. Tek kart bilgisayar donanımına bağlanan sensörler; iç ortam sıcaklık ve nem bilgisini almak için DHT22, ışık şiddeti bilgisini almak için LDR, Bölüm 2'de verilen ısı transfer hızını hesaplayabilmek için gerekli olan dış ortam sıcaklık bilgisini almak için DS18B20 ve ortamdaki hareket bilgisini almak için PIR sensörüdür.



Şekil 3. Merkezi akıllı kontrol birimi ve konum denetim birimlerinin temsili gösterimi. (Representation of central intelligent control unit and position control units.)

Kullanılan sensörler ve konum denetim birimlerinin elektronik donanımları Şekil 4'te üretilen prototip üzerinde gösterilmektedir. Verilen şekilde her birim, birbirinden farklı olarak numaralandırılmış ve bu birimler Tablo 1'de sırası ile listelenmiştir. Üretilen prototipe yerleştirilen sensörler şekilde gösterildiği gibi özelliklerine göre konumlandırılmıştır. Hava kalite ve sıcaklık sensörleri bu amaçla dışa bakar şekilde yerleştirilmiştir. Benzer şekilde hareket algılama, ışık ve kızılötesi led sensörleri cihazın ön kısmına yerleştirilerek ortama hakim olması amaçlanmıştır. Cihazın arka kısmına ise güç adaptörü girişi ve ışık seviyesi kontrolü için darbe genişlik kontrolü, PWM (Pulse Width Modulation) bağlantısı yerleştirilmiştir.



Şekil 4. BAKS sisteminin konum denetim birimlerinde kullanılan elektronik donanımlar. (Electronic equipment used in position control units of the BAKS system.)

Tablo 1. BAKS sisteminin konum denetim biriminde kullanılan donanım bileşenleri. (Hardware components used in the position control unit of the BAKS system.)

Numara	Donanım Adı
1	Tek kart bilgisayar
2	Baskı devre kartı
3	Hava kalite sensörü
4	Sıcaklık Nem sensörü
5	Dış sıcaklık sensörü
6	Işık şiddeti sensörü
7	Hareket sensörü
8	Kızılötesi led
9	Güç kablosu
10	Dimmer devresinin pwm bağlantısı

Ortam sıcaklığı ve nem oranı, iklimlendirme cihazlarının etki edebilmek için en çok enerji sarf ettiği değişkenlerdendir. Küresel bazda binalarda kullanılan enerjinin %40 gibi önemli bir oranı sıcaklık ve nem değerlerini ısısal konfor şartlarını sağlayacak seviyeye getirmek için harcanmaktadır [12]. Aynı zamanda sıcaklık ve nem ortamda bulunan insanların sağlığına doğrudan etki etmektedir [13]. Bu sebeplerden dolayı sıcaklık ve nem değerleri gerçek zamanlı olarak takip edilmeli ve aynı zamanda enerji verimliliği ve sağlıklı ortam şartlarının sağlanması için kontrol altında tutulmalıdır. BAKS sistemindeki her konum denetim biriminde ortamdaki sıcaklık ve nem değerlerinin elde edilmesi için bir DHT22 sensörü kullanılmıştır. Bu sensör -40 - 80°C sıcaklık aralığında +/-1°C hata payıyla sıcaklık bilgileri sağlarken %0 - %100 nem aralığında +/- %5 hata payıyla nem bilgileri sağlamaktadır [14]. Dış sıcaklık verileri için ise su geçirmeme özelliğine sahip olması sebebiyle DS18B20 sıcaklık sensörü tercih edilmiştir.

Ortam aydınlatması için tüketilen enerji, iklimlendirme cihazları için tüketilen enerji kadar fazla olmasa da genel tüketim üzerinde önemli bir paya sahiptir [15]. Geliştirilen sistem ile aydınlatmanın en uygun seviyede tutulabilmesi için ortamdaki ışık şiddeti ölçülerek aydınlatma seviyesi ayarlanmaya çalışılmıştır ve böylece gereksiz enerji kullanımının önüne geçilmiştir. Işık şiddeti bilgilerini elde etmek için LDR sensörü kullanılmıştır. Bu sensör üzerine düşen ışık şiddetiyle ters orantılı olarak direnç değerini değiştirmektedir. Böylece ortam aydınlatmasının uygun olmadığı durumlarda aydınlatmanın parlaklık seviyesi yönetilerek en uygun seviyenin korunması sağlanmıştır.

Ortamda aydınlatma ve iklimlendirme cihazlarının kontrolü sağlanırken aktif kullanıcı varlığının tespiti için hareket sensörü kullanılmıştır. Böylece, tüketim veriminin yanı sıra aydınlatma ve iklimlendirme cihazlarının açık unutulması gibi sorunlara da çözüm üretilmiştir. Ortamdaki aktif kullanıcının varlığı hakkında bilgiler sağlaması amacı ile sisteme bütünleşmiş bir PIR sensörü (Pasif Kızılötesi Sensör) kullanılmıştır. Bu sensör ortamdaki nesnelere yayılan kızılötesi dalgaları algılayabilmekte ve böylece harekete duyarlı olarak bir çıkış değeri üretmektedir.

Kontrolü sağlanan ortamda sağlığı tehdit eden karbondioksit, alkol, benzen ve karbon monoksit

gibi gazların tespiti için bir hava kalite sensörü kullanılmıştır. Tercih edilen MQ-135 sensörü -40°C - 125°C sıcaklık aralığında çalışabilmekte ve ortamın hava kalitesi bilgisini devamlı olarak takip edebilmektedir. Konum denetim birimi tarafından sağlanan bu veriler aynı zamanda merkezi akıllı kontrol birimine iletilmekte ve belirlenen eşik değerlerinin aşıldığı acil durumlarda merkezi akıllı kontrol biriminde sesli olarak uyarı sağlanmaktadır. Böylece yangın ve gaz kaçağı gibi olası tehlikelere karşı önlem alınmaktadır [16].

Son olarak, iklimlendirme cihazlarının kontrolü için bir kızılötesi LED ve aydınlatma cihazlarının parlaklık kontrolü için bir dimmer devresi kullanılmıştır. Kızılötesi LED ile iklimlendirme cihazına kumanda komutları gönderilmektedir ve tüm işlevler kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, dimmer devresi ile konum aydınlatması açılıp kapatılarak veya parlaklığı değiştirilerek kontrol edilmektedir.

3.2. Yazılım (Software)

BAKS sistemindeki donanımların kontrolü için Python programlama dili ve QT Kütüphanesi kullanılarak kullanıcı ara yüzü bir yazılım gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım temel olarak 3 farklı aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada konum denetim cihazlarının sensör ağı yardımıyla elde ettikleri ortam verilerinin merkezi akıllı kontrol birimine iletilmesini sağlanmaktadır. İkinci aşamada konum denetim cihazlarından gelen verilerin merkezi akıllı kontrol birimi tarafından değerlendirilmesi ve bu doğrultuda oluşturulan komutların tekrar konum denetim cihazlarına iletilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca konum denetim cihazlarından elde edilen veriler, gerçek zamanlı veya geçmişe yönelik olarak izlenebilmek için kaydedilmektedir. Son olarak üçüncü aşamada konum denetim cihazlarının bulunduğu ortamdaki iklimlendirme ve aydınlatma cihazlarının kontrol edilmesini sağlanmaktadır. Bu üç aşamanın bir döngü içinde tekrarlanmasıyla sistemin dinamik bir biçimde çalışması sağlanmıştır.

Geliştirilen BAKS sisteminde sayıları birden fazla olan konum denetim cihazları ve merkezi akıllı kontrol birimi arasındaki haberleşmeyi sağlamak amacıyla MKTT (Mesaj Kuyruk Telemetri Taşıma) protokolü kullanılmıştır. Birimler arası haberleşmede kullanılan MKTT(Mesaj Kuyruk Telemetri Taşıma) protokolü yayınlama ve abone olma mantığına dayanmaktadır. Veri sağlayıcıları ve aboneler arasındaki haberleşmenin

sağlanmasında kullanılabilen protokol, bir ağ üzerinde belirlenen konu veya konular altında birden çok modülün bir veya birden fazla merkezle iletişim kurmasına olanak sağlamaktadır [17]. Bu sayede sisteme ek bir donanıma ihtiyaç duymadan çoklu modül desteği özelliği kazandırılmıştır.

Geliştirilen yazılımda 5 dakikada bir konum denetim birimlerinden merkezi akıllı kontrol birimine veriler MKTT protokolü ile gönderilerek iletişim sağlanmaktadır. Bu verilerin aynı zamanda geçmişe yönelik olarak incelenebilmesi için kaydedilmesi gerekmektedir. Uzun süreli çalışmada verilerin çokluğu sebebiyle veri tabanı boyutunun artmasını önlemek için BAKS sisteminde çevrimsel sıralı(Round Robin) veri tabanı kullanılmıştır. Çevrimsel sıralı veri tabanı, verilerin dairesel bir şekilde öncelik olmadan eşit paylar ile tutulmasını sağlar [18]. Veri tabanı dosyası belirlenen sınıra ulaşıldığında ise gelen yeni veriler için en eski veriler veri tabanından kaldırılır ve yeni verilere yer açılır. BAKS sisteminde iç ve dış sıcaklık, nem, hava kalitesi, aydınlatma ve hareket durumu verileri 10 yıl için 5 dakikalık zaman aralığıyla kaydedilmektedir. Bu süre dolduğunda ise eski verilerin üzerine yazılarak döngü devam etmektedir.

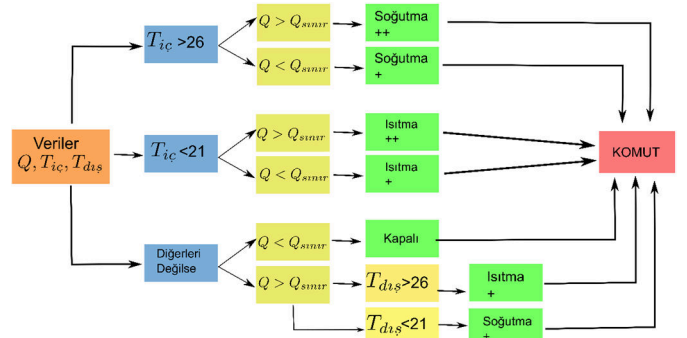
Kontrol edilen alanlarda bulunan aydınlatma ve iklimlendirme cihazlarının kontrolü için konum denetim cihazlarından gelen ortam verileri kullanılarak merkezi akıllı kontrol birimi tarafından iklimlendirme cihazı ve aydınlatmada kullanılan dimmer devresi için komutlar üretilmektedir. Bu üretilen komutlarda ise ortamda aktif kullanıcı bulunup bulunmadığı temel alınmaktadır. Aktif kullanıcı bilgisi kontrol edilen alanlarda bulunan iklimlendirme ve aydınlatma cihazlarının sadece alanın kullanıldığı zamanlarda çalışması, böylece açık unutulma riskine karşı tedbir alınması sağlanmaktadır. Komutların işleyişindeki hata oranının azaltılması ve bu mantığın düzenli işlemesi için son 10 dakika içinde alınan aktif kullanıcı bilgileri kontrol edilmektedir. Ortamda son 10 dakika içinde en az bir kez aktif kullanıcı algılanırsa sistem tarafından ortamda aktif kullanıcının var olduğu kabul edilmektedir. Ortamda aktif kullanıcı algılanan durumlarda, aydınlatma ve iklimlendirme cihazlarının çalışma durumu ortamdaki iç ve dış sıcaklık, nem, ışık seviyesi ve hava kalitesi verilerine göre üretilen komutlarla kontrol edilmektedir. Bu komutlar hesaplanırken ideal olarak kabul edilen ortam koşulu değerleri sıcaklık

için 21°C-26°C aralığında, nem oranı için %40-%60 aralığındadır[19].

Sistemde sıcaklık komutları oluşturulurken Bölüm 2’de verilen hesaplamalar kullanılmaktadır. Bu hesaplamalar konum denetim biriminin bulunduğu ortamlar için farklılık göstereceğinden bir ön çalışma yapılması gerekmektedir. Yapılan ön çalışmalar sonucu konfigürasyon tamamlandığında sistem kullanılacağı konuma adapte edilmiş olacaktır. Böylece, sıcaklık verileri ve elde edilen ısı transfer hızı (Q) değerinden faydalanılarak iklimlendirme cihazı kontrol edilmekte ve ortam sıcaklığı uygun konfor seviyesinde sabit tutulmaya çalışılmaktadır.

Kontrol işlemi için gerekli komutların oluşturulduğu algoritma Şekil 5’te gösterilmiştir. Geliştirilen algoritmada iç ve dış ortamdaki ani soğuma ve ısınmalardan sistemin etkilenmemesi için son 10 dakikada alınan sıcaklık verilerinin ortalaması kullanılmıştır. İlk olarak iç ortam sıcaklığı ideal ortam sıcaklığı sınırları ile karşılaştırılarak iklimlendirme cihazının ısıtma veya soğutma kiplerinden hangisini gerçekleştireceği belirlenmektedir. Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Topluğu (ASHRAE) tarafından tavsiye edilen ideal ortam sıcaklık aralığı 21°C-26°C arasındadır [19]. İç sıcaklığının, $T_{iç}$, 26°C’den yüksek olduğu durumlarda soğutma, 21°C’den düşük olduğu durumlarda ise ısıtma işlemi uygulanmaktadır. Bir sonraki aşamada uygulanan iklimlendirme işleminin hızı; 10 dakikalık ortalama iç ve dış sıcaklık verileri ile hesaplanan $Q_{ortalama}$ değeri ve 1°C iç/dış sıcaklık farkı için hesaplan tolera edilebilir ısı transfer hızı olarak tanımlanan $Q_{sınır}$ değeri ile karşılaştırılarak belirlenmektedir. Bu karşılaştırma sonucunda $Q_{ortalama}$ değerinin $Q_{sınır}$ değerinden büyük olduğu durumlarda, ortamda istenmeyen ısı kazanç veya kayıp miktarının yüksek olması nedeniyle iklimlendirme işleminin hızı yüksek seviyede tutulmakta, küçük olduğu durumlarda ise düşük seviyede tutulmaktadır.

İç ortam ideal olarak belirlenen 21°C-26°C aralığında olduğu durumlarda ise öncelikle $Q_{ortalama}$ değeri ile $Q_{sınır}$ değeri tekrar karşılaştırılmaktadır ve $Q_{ortalama}$ değerinin $Q_{sınır}$ değerinden küçük olduğu durumlarda iklimlendirme cihazları ısıtma veya soğutma işlemi gerçekleştirmemekte ve iklimlendirme cihazı bekleme moduna alınmakta, yüksek olduğu durumlarda ise dış sıcaklığa, $T_{dış}$, bağlı olarak belirlenen ısıtma veya soğutma işlemini düşük hızda gerçekleştirmektedir.



Şekil 5. İç sıcaklık, dış sıcaklık ve ısı transfer hızından faydalanılarak sıcaklık komutlarının oluşturulması.

(Establishing temperature commands using internal temperature, outside temperature and heat transfer rate.)

Kontrol edilen ortamda ideal seviyede tutulması gereken bir diğer etken ise nem oranıdır. İdeal olarak belirlenen nem oranı %40-%60 değerleri arasındadır. İklimlendirme cihazı ısıtma veya soğutma kipinde çalışırken aktif olan fan yardımıyla nem değeri uygun seviyelerde tutulabilmektedir. Ortam sıcaklığı belirlenen ideal değer aralığında ve nem oranı belirlenen ideal değer sınırlarının dışında ise iklimlendirme cihazının yalnızca fan kipi kullanılarak nem oranı belirlenen idealler arasında tutulmaktadır.

Aydınlatma cihazlarının kontrolü için, ışık şiddeti değerleri kullanılmaktadır. Gerekli kalibrasyonların yapılabilmesi için ışık şiddeti verilerinin alınacağı sensörün günün farklı zaman dilimlerinde aldığı değerler bir gün süresince takip edilerek kayıt altına alınmıştır. Kaydedilen bu değerler Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Aydınlatma ihtiyacına karşılık gelen ışık şiddeti değerleri. (Light intensity values corresponding to lighting needs.)

LDR’den alınan değer	Aydınlatma Durumu
1000	%0
1800	%10
2900	%20
3600	%30
4500	%40
5200	%50
10000	%60
17000	%70
18500	%80
20000	%90
22000	%100

Tabloda görüldüğü gibi kaydedilen değerler aydınlatma ihtiyacıyla doğru orantılı olarak

artmaktadır. BAKS sisteminde aydınlatma cihazlarının kontrolü için bu tabloda faydalanılmaktadır. Konum denetim birimlerinden gelen ışık şiddeti verilerinin son 10 dakikadaki ortalamaları kullanılarak, tabloda verilen ışık şiddetine bağlı aydınlatma ihtiyacı belirlenmektedir. Bu ihtiyaca göre bir dimmer devresi aracılığıyla ortam aydınlatması için kullanılan aydınlatma cihazlarının parlaklıkları değiştirilmektedir.

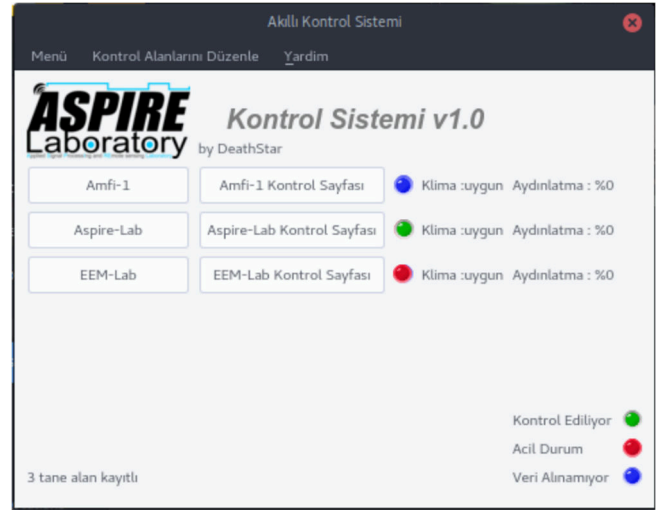
Son olarak, konum denetim biriminin bulunduğu alanlarda hava kalitesinin denetlenmesi ve takip edilmesi sağlanmaktadır. Her ortam için son 10 dakikada kaydedilen hava kalitesi verilerinin ortalamaları kullanılarak ortalama bir hava kalite değeri hesaplanmaktadır. Bu değer, belirlenen referans değerleri ile karşılaştırılarak hava kalitesi kontrolü sağlanmaktadır. Tablo 3' te T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın belirlediği sınır değerler verilmiştir [20]. Tabloda verilen EPA Hava Kalitesi İndeksi değerleri referans alınarak kontrol edilen alanda bulunan iklimlendirme cihazının fan düzeyleri kontrol edilmektedir. Ortamdan alınan 0-50 arasında ise fan kapalı, 51-100 arasında ise fan düşük devirde, 101-150 arasında ise fan orta devirde, 151 ve daha büyük değerlerde ise fan yüksek devirde çalışmaktadır. Bunun yanı sıra uyarı sesi çalınacak değerler de bu tablo referans alınarak belirlenmiştir. Tabloya göre belirlenen uyarı sesi sınır değeri 151'dir.

Tablo 3. T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın referans aldığı EPA Hava Kalitesi İndeksi ve BAKS sisteminin bu değerlere karşılık oluşturduğu tepkiler. (The EPA Air Quality Index and the BAKS system, which the T.C Ministry of Environment and Urbanization referenced, responded to these values.)

Sağlık Endişe Seviyeleri	Hava Kalite İndeksi (AQI) Değerler	Fan Seviyesi	Uyarı Sesi Değerler
İyi	0-50	Kapalı	×
Orta	51-100	Düşük	×
Hassas	101-150	Orta	×
Sağlıksız	151-200	Yüksek	✓
Kötü	201-300	Yüksek	✓
Tehlikeli	201-300	Yüksek	✓

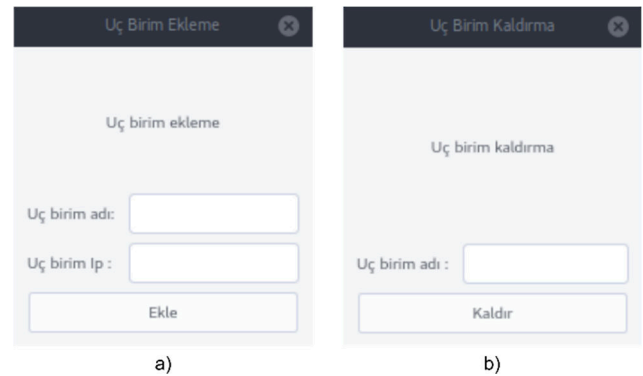
Ayrıca, BAKS sisteminde merkezi akıllı kontrol birimi üzerinden verilerin, iklimlendirme ve aydınlatma cihazlarının ve sistemin çalışma

durumunun kontrol edilebileceği bir grafiksel kullanıcı ara yüzü geliştirilmiştir. Geliştirilen kullanıcı ara yüzünün ana ekranı Şekil 6'da gösterilmiştir. Bu ekran kayıtlama, kayıt silme, konum verilerine erişim ve kayıtlı modüllerin yüzeysel takibinin sağlanması için kullanılmaktadır. Kayıtlı konumların yanlarında bulunan ve yanıp sönen göstergelerin renginin yeşil olması ortamdaki veri alınabildiğini, mavi olması veri akışında bir sorun olduğunu ve kırmızı olması ise ortamda gaz kaçağı veya yangın gibi acil bir durum olduğunu göstermektedir.



Şekil 6. Geliştirilen kullanıcı ara yüzünün ana ekranı. (Home screen of the developed user interface.)

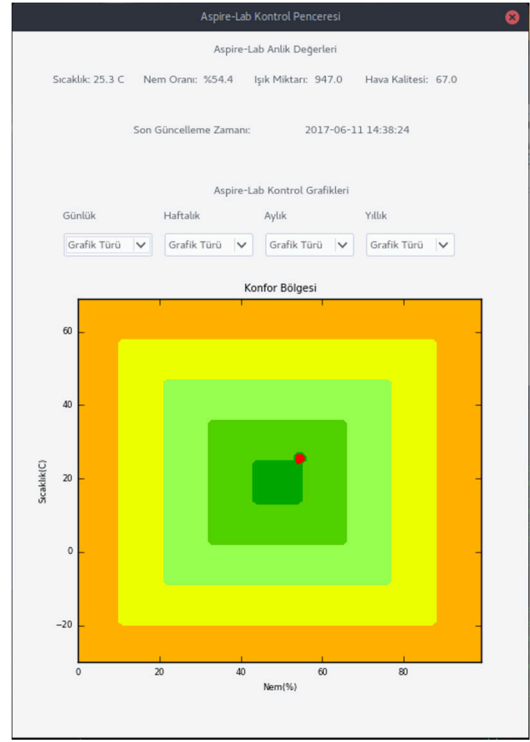
Ana ekran ayrıca uç birim ekleme, uç birim kaldırma ve konum kontrol monitörüne erişim imkanı sunmaktadır. Uç birim ekleme ve uç birim kaldırma pencereleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekil 7a'da gösterilen uç birim ekleme penceresinde, merkezi akıllı kontrol birimi tarafından kontrol edilmek üzere yeni bir alan (konum denetim birimi) eklenirken kullanıcıdan o alanın IP adresi ve ismi istenmektedir. Şekil 7b'de gösterilen uç birim kaldırma penceresi ise kayıtlı konum denetim cihazlarının izlemesini sonlandırmak için tasarlanmıştır ve uç birim adı girilerek kayıtlı bir modül silinebilmektedir.



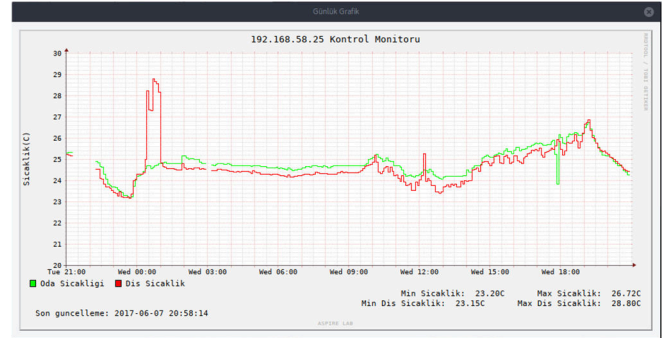
Şekil 7. Uç birim pencereleri; a) Yeni konum denetim birimi eklemek için hazırlanan uçbirim ekleme alanı b) Kayıtlı konum denetim birimlerinin izlemeyi çıkarılması için hazırlanan uç birim kaldırma ekranı. (End unit windows; a) Terminal insertion area prepared for inserting a new position control unit b) End unit removal screen prepared for monitoring the registered position control units.)

Ana ekrandan erişilebilecek bir diğer ekran ise Şekil 8’de gösterilen konum kontrol penceresidir. Bu pencere kullanıcının konumlarının anlık verilerinin yanı sıra tüm verilerin günlük, haftalık, aylık ve yıllık grafiklerine de ulaşmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda bu ekranın altında bulunan ısı konfor bölgesi grafiği ortamdaki anlık sıcaklık ve nem verilerine görsel olarak anlam kazandırmaktadır. Grafikte dikey eksen sıcaklık yatay eksen ise nem değerlerini temsil etmektedir. Grafiğin merkezinde koyu yeşil olarak gözükken alan ısı konfor seviyesinin en yüksek olduğu bölgedir. Anlık verilerin ortam sıcaklığı için 21-26°C , nem oranı için ise %40-%60 aralığında bulunması durumunda en yüksek ısı konfor seviyesine ulaşılmakta ve bu alan grafikte koyu yeşil renkte gösterilmektedir. Bu veriler ideal değerlerden uzaklaştıkça ısı konfor seviyesi yeşilden turuncuya doğru azalmaktadır.

Kullanıcının konum kontrol penceresinden ulaşabileceği örnek bir günlük iç ve dış sıcaklık grafiği penceresi Şekil 9’da gösterilmiştir. Bu pencerede kullanıcı iç ve dış sıcaklık değerlerinin gün içerisinde aldığı en düşük ve en yüksek değerleri görebilmektedir. Ayrıca kayıtlı her alan için oluşturulan bu grafik sayesinde kullanıcıya kıyaslama yapma imkanı sunulmuştur. Şekilde gösterilen sıcaklık grafiği gibi nem, hava kalitesi ve ışık şiddeti verileri de günlük, haftalık, aylık ve yıllık zaman aralıklarında oluşturulmuş grafiklerle takip edilebilmektedir.



Şekil 8. Konum kontrol penceresi. Bu pencere kullanıcının seçilen alanın anlık değerlerine, veriler için oluşturulan günlük, haftalık, aylık ve yıllık grafiklere ve seçilen alanın ısı konfor bölgesi grafiğine erişmesini sağlamaktadır. (Position control window. This window allows the user to access the instantaneous values of the selected area, the daily, weekly, monthly and yearly graphs generated for the data and the graph of the thermal comfort zone of the selected area.)



Şekil 9. BAKS sistemi tarafından konum kontrol penceresinden kullanıcıya sunulan örnek bir günlük iç-dış sıcaklık grafiği penceresi. (A sample daily indoor-outdoor temperature graph window presented by the BAKS system to the user via the position control window.)

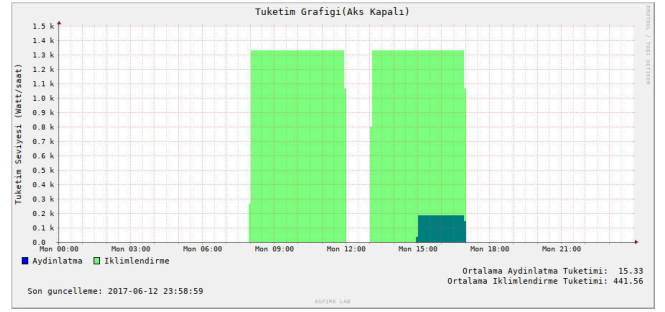
4. VERİMLİLİK TESTLERİ (EFFICIENCY TESTS)

BAKS sisteminin verimlilik testleri sadece aktif kullanıcı bulunduğu zamanlarda aydınlatma ve iklimlendirme gereksinimleri bulunan bir laboratuvar da gerçekleştirilmiştir. Testlerin gerçekleştirildiği laboratuvar Şekil 10’da gösterilmektedir.



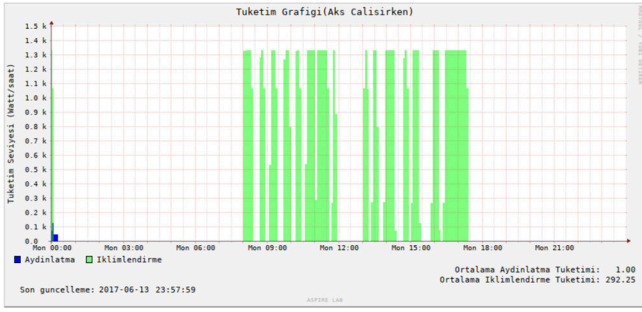
Şekil 10. BAKS sisteminin testlerinin gerçekleştirildiği laboratuvar. (The laboratory where the tests of the BAKS system are carried out.)

Şekilde görülen laboratuvar Doğu Karadeniz Bölgesinde $41,037770^\circ$ E, $40,494420^\circ$ N enlem ve boylamındaki binanın 7. Katında bulunmaktadır ve 126 metreküp hacme sahip odanın dış cephesi kuzeybatı yönündedir. Test aşamasında, sırasıyla soğutma ve ısıtma giriş güçleri 1333 W ve 2000 W olan bir portatif klimanın ve test ortamında bulunan 23 W gücündeki 8 adet aydınlatma cihazının enerji tüketimi kayıt altına alınmıştır. Bu laboratuvarında, 12.06.2017 tarihinde iklimlendirme ve aydınlatma cihazlarının operatör kontrolünde çalıştırılmasıyla oluşan tüketim grafiği Şekil 11’de gösterilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere yaz mevsiminin etkisiyle klimanın soğutma güç sarfiyatı mesai saatleri içerisinde laboratuvarın enerji tüketimine yüksek seviyede etki etmiştir. Ayrıca 15.00’den itibaren aydınlatma cihazlarının çalışmasıyla oluşan güç tüketimi grafikte görülmektedir. Oluşan bu grafiğe göre iklimlendirme cihazlarının günlük ortalama enerji tüketimi 441.56 W/h iken aydınlatma cihazları için bu değer 15.33 W/h’tir. Buna göre günlük ortalama toplam tüketim miktarı ise 456.89 W/h’tir.



Şekil 11. Testlerin yapıldığı laboratuvarında 12.06.2017 tarihinde BAKS sistemi olmadan operatör tarafından kontrol edilmiş iklimlendirme ve aydınlatma cihazlarının tüketim grafiği. (Consumption chart of the air conditioning and lighting devices controlled by the operator without the BAKS system on 12.06.2017 in the laboratory where the tests are made.)

Test edilen sistemle enerji tüketiminde verim sağlamak ve ortam şartlarını uygun seviyede tutmak hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk olarak laboratuvara bir konum denetim birimi yerleştirilmiş ve çalıştırılmıştır. Ardından merkezi akıllı kontrol birimine konum denetim birimi uç birim olarak eklenmiştir ve enerji yönetimi başlatılmıştır. Bir gün boyunca 13.06.2017 tarihinde test edilen sistem saat 00.00 da çalıştırılmış ve konumdaki iklimlendirme ve aydınlatma cihazlarının kontrolü BAKS sisteminin yönetimine bırakılmıştır. Laboratuvar BAKS sisteminin kontrolü altında iken yapılan enerji tüketimi grafiği Şekil 12’de gösterilmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi saat 09.00’da sistem laboratuvarında aktif kullanıcı algılamış ve iklimlendirme cihazını çalıştırmıştır. Öğle tatili başlangıcı olan saat 12.00’a kadar sistem sadece gerekli bulunduğu durumlarda iklimlendirme cihazını çalıştırmış, gerek duyulmayan ortam şartları oluştuğunda iklimlendirme cihazını kapatarak enerji tüketimini sonlandırmıştır. Saat 12.00-13.00 arası ise sistem laboratuvarında aktif kullanıcı algılamamış ve cihazları kapatmıştır. Öğle tatilinden sonra saat 13.00-17.30 arasında sistem, gerekli gördüğü durumlarda iklimlendirme cihazını çalıştırmış diğer durumlarda kapatmıştır. Bunun yanında sistem çalıştığı süre boyunca ortamda aydınlatma cihazını çalıştırmaya ihtiyaç duymamıştır. Böylelikle BAKS sisteminin kontrolü altındaki laboratuvarın enerji tüketimi günlük ortalama 293,25 W/h saat olmuştur.



Şekil 12. Aynı laboratuvarıda 13.06.2017 tarihinde BAKS sistemi ile kontrol edilen iklimlendirme ve aydınlatma cihazlarının tüketim grafiği. (Consumption chart of air conditioning and lighting devices controlled by BAKS system on 13.06.2017 in the same laboratory.)

5. SONUÇLAR (RESULTS)



Sınırlı enerji kaynaklarının doğru ve verimli kullanılması büyük önem arz etmektedir. Özellikle çok katlı ve çok odalı binalarda iklimlendirme cihazlarının gereksiz kullanımı sebebiyle oluşan enerji kayıplarının önlenmesi, iklimlendirme cihazları ile ortam nem ve sıcaklık seviyelerinin ideal seviyelerde tutulması ve aydınlatma cihazlarının otomatik kontrolü hem ekonomi hem de insan sağlığı açısından önemlidir. Bu çalışmada, enerjinin verimli kullanımını sağlamak için çoklu modül destekli yazılım tabanlı bir akıllı kontrol sistemi olan BAKS geliştirilmiş ve kaynak kodları paylaşılmıştır [21]. Geliştirilen sistemin özellikle gereksiz elektrik sarfiyatını sınırlandırması ve insan sağlığına uygun ortam şartlarını sağlaması bu çalışmayı benzerlerinden ayırmakta ve farklı kılmaktadır. BAKS sistemi ile yapılan testlerde, kontrolü altındaki bir ortamda güneşlenme süresine bağlı olarak aydınlatma ve iklimlendirme cihazlarının enerji tüketiminin, konfordan ödün vermeden 456,89 W/h 'ten 293,25 W/h' e düşürülmesi başarmış ve %35,81 oranında tasarruf sağlandığı gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra ideal sıcaklık hesaplamaları yapılırken dış hava sıcaklığının da etkisinin olması ile ortamdaki ani ısınma ve soğumalar engellenmiş, insan sağlığını olumsuz etkileyen durumlar ortadan kalkmıştır. Sistem aynı zamanda operasyonunda ortamdaki hareket verilerini temel alarak aydınlatma ve iklimlendirme cihazlarının gereksiz kullanımını engellemiştir. Ayrıca BAKS sistemi ortamın hava kalitesini sürekli denetleyerek tehlikeli seviyelere ulaşan zehirli gaz tespit edildiğinde havalandırma sistemini çalıştırmakta ve merkezi kontrol biriminde operatörü uyararak bir erken ikaz sistemi olarak da görev yapmaktadır.

Geliştirilen BAKS sistemi, kullanıcıların kontrol ettikleri konumlardaki verilerin belirledikleri zaman aralığındaki değişimlerini görebilmesine, farklı kontrol alanları ile aralarındaki farkı yorumlayabilmesine, anlık ya da geçmişe dönük verilere ulaşabilmesine imkan sağlamaktadır.

REFERENCES

- [1] F. D. AYKAL, B. GÜMÜŞ, and Y. B. Ö. AKÇA, "Sürdürülebilirlik kapsamında yenilenebilir ve etkin enerji kullanımının yapılarda uygulanması", *V. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu YEKSEM*, vol. 9, pp. 19–22, 2009.
- [2] A. Vojdani, "Smart integration", *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 6, no. 6, pp. 71–79, 2008.
- [3] P. Zhang, F. Li, and N. Bhatt, "Next-generation monitoring, analysis, and control for the future smart control center", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 2, pp. 186–192, 2010.
- [4] Y. Ozturk, D. Senthilkumar, S. Kumar, and G. Lee, "An intelligent home energy management system to improve demand response", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 694–701, 2013.
- [5] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo, "Real-time demand response model", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 236–242, 2010.
- [6] D.-M. Han and J.-H. Lim, "Design and implementation of smart home energy management systems based on zigbee", *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 3, 2010.
- [7] B. Tuysuz and Y. Mahmutoglu, "Measurement and mapping of the gsm-based electromagnetic pollution in the black sea region of turkey", *Electromagnetic biology and medicine*, vol. 36, no. 2, pp. 132–140, 2017.
- [8] K. İnal and M. A. Akcayol, "Gsm tabanlı akıllı ev uygulaması", *Bilisim Teknolojileri Dergisi*, vol. 2, no. 2, 2010.
- [9] Y. Y. Kardaş and M. S. ÖZERDEM, "Gsm Kontrollü Akıllı Ev Uygulaması", *Dicle*

- Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, vol. 6, n. 1, pp. 9-18, 2015.
- [10] Y. A. Cengel, "Heat transfer: a practical approach" *WBC McGraw-Hill*, 1998.
- [11] Ö. Kaynaklı and R. Yamankaradeniz, "Isıtma Süreci ve Optimum Yalıtım Kalınlığı Hesabı", *VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı*, pp. 187-195, 2007.
- [12] S. B. ERDEDE and S. BEKTAŞ, "Ekolojik açıdan sürdürülebilir taşınmaz geliştirme ve yeşil bina sertifika sistemleri", *Harita Teknolojileri Elektronik Dergisi*, vol. 6, no. 1, pp. 1-12, 2014.
- [13] Ö. Akyazı, M. Usta, and A. Akpınar, "Kapalı ortam sıcaklık ve nem denetiminin farklı bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmesi", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 2011, pp. 16-18.
- [14] "DHT22 temperature and humidity sensor" <https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/DHT22.pdf>, Erişim Tarihi: 14-12-2017.
- [15] M. T. Gençoğlu, "İç Aydınlatmada Enerji Tasarrufu", *III. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi*, 2005.
- [16] "Olimex. Technical Data MQ-135 Gas Sensor", <https://www.olimex.com/Products/Components/Sensors/SNSMQ135/resources/SNS-MQ135.pdf>, Erişim Tarihi: 27-12-2017.
- [17] K. Tang, Y. Wang, H. Liu, Y. Sheng, X. Wang, and Z. Wei, "Design and implementation of push notification system based on the mqtt protocol", *International Conference on Information Science and Computer Applications (ISCA 2013)*, 2013, pp. 116-119.
- [18] "RRD Tool", <http://oss.oetiker.ch/rrdtool/>. Erişim Tarihi: 27-12-2017.
- [19] "ASHRAE Standard-Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy", <https://www.ashrae.org/resources--publications/bookstore/standard-55-and-user-s-manual>. Erişim Tarihi: 27-12-2017.
- [20] "T.C Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Hava Kalitesi İndeksi" <http://www.havaizleme.gov.tr/hava.html>. Erişim Tarihi: 16-05-2017.
- [21] "AKS Sistem Kaynak Kodları", <https://gitlab.com/aspedisca/AKS-OpenSource>, Erişim Tarihi: 27-12-2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 21-07-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 19-01-2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.330123	

Tarımsal ürün bilgilerinin bir gezgin robot yardımıyla temin edilen görüntülerin işlenmesi yoluyla analiz edilmesi

Sedat Turan*¹, Tolga Aydın²

ÖZ

Robotik sistemlerin bir çeşidi olan gezgin (mobil) robotların kullanımı, günlük yaşamımızın farklı alanlarında gelişerek arttığı görülmektedir. Bu çalışmada, tarımsal alanlarda bilgisayar veya yüz tanıma ile otomatik kontrol edilebilen gezgin robot kullanılarak domates bitki meyvesinin görüntü işleme ile tespit ve analiz edilmesi amaçlanmıştır. Renk tespit ve izleme görüntü işleme yöntemiyle meyvelerin yerlerinin tespiti, kenar ölçüleri, alan büyüklüğü ve renk doygunluğu elde edilerek daha önce oluşturulmuş veri seti ile kullanıcıya meyve ile ilgili yaklaşık ağırlık bilgisi verilmiştir. Çalışma ile tarımsal araştırma merkezlerinde veya büyük üreticilerin ar-ge birimleri için, hasat edilecek meyve ile ilgili gelişim bilgilerinin bilgisayar sistemine dayalı gezgin robot ile yapılabilirliği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Görüntü işleme, robotik, tarımsal analiz, ürün bilgisi

Analysis of the agricultural product information by processing the images obtained with the help of a mobile robot

ABSTRACT

Mobile robots, a kind of robotic system, are now being used ever more in different areas of daily life. In this study, it is aimed to determine and analyze tomato plant fruits by image processing by using computer or mobile robot which can be controlled automatically by facial recognition in agricultural areas. The determination of the locations of the fruits, the edge measurements, the area size and the color saturation were obtained by the color detection and tracking image processing method and the approximate weight information about the user's fruit was given with the data set created before. The study demonstrated the feasibility of harvestable fruit-related information with agricultural robots based on computer systems for agricultural research centers or large farmers.

Keywords: Image processing, robotics, agricultural analysis, product information

This work was presented as an oral paper at the 2nd International Engineering Architecture and Design Congress.

*1 Erzincan University, Refahiye Vocational School Mechatronics Program, Erzincan- sturan@erzincan.edu.tr

²Atatürk University, Department of Computer Engineering, Erzurum- atolga@atauni.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılan robot kelimesi ilk defa, Çekçe’ de “zorla çalıştırılan işçi” manasına gelen “robota” kelimesi olarak 1921 yılında Karel Capek’in RUR (Rossum'un Evrensel Robotları) isimli tiyatro eserinde kullanılmıştır [1] [2].Farklı amaçlar için tasarlanmış birçok görevi yerine getirebilen, kendi kendine hareket edebilen, elektronik, mekanik ve yazılımdan oluşan bu yapılar; işlem yapma, işlemden sonuca varma, yargıya varma ve yeni işlemi belirleme yetilerini bulundurmaları zorundadır [3] [4]. Robotun çalışma hacmi bir referans koordinat sistemine göre yer değiştirmiyorsa bu robota gezgin olmayan robot, yer değiştiriyor ise bu robota “Gezgin veya Mobil Robot” denir [5].Yapısal olarak tekerlekli, bacaklı ve kanatlı olmak üzere üç farklı türü olan gezgin robotlar günümüzde pek çok alanda kullanılmaktadır.

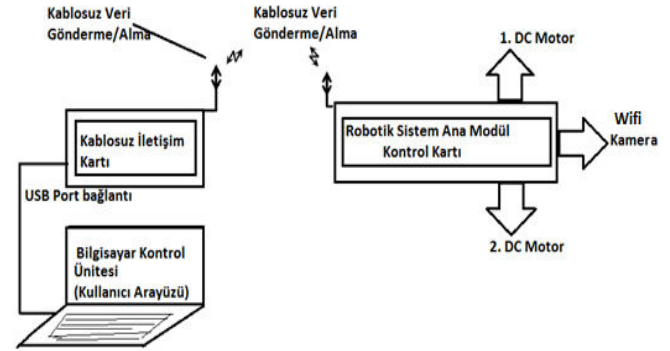
Bilgisayar, elektronik ve robotik sistemlerin hızlı geliştiği günümüzde tarımsal alanlarda yapılan çalışmaların insan gücü ve kontrolü yerine teknolojik gelişmelere adım adım geçtiği görülmektedir. Ülkemizde ve dünyada tarımsal alanlarda teknolojinin kullanımı, kaliteli ürün elde edilmesi, işgücünün azaltılması gibi nedenlerle büyük gelişme içerisinde [4]. Tarım alanındaki bu gelişmeler bilişim çağının gelişen teknolojilerinin ekonomik ve çevre ile bütünleşik üretim faaliyetlerinde kullanımını ifade eden Hassas Tarım’ı işaret etmektedir [6]. Teknolojideki gelişmeler doğrultusunda tarımsal alanlarda kullanılan mekanik yapılara ilaveten bilgisayarlı sistemler eklenerek bu yapılara farklı özellikler katılmıştır. Tarımsal alanlarda kullanılan başlıca hasat makinelerinin bakıldığında, geliştirilerek bilgisayar görmesine dayalı robotik sistemlere doğru gittiği açıkça ortadadır. Çeşitli algılayıcılar ve bu algılayıcılardan gelen veriler doğrultusunda görüntü işleme tekniklerinin de kullanılması tarımsal alanlarda robotik tarıma geçişi sağlamaktadır.

Tarımsal robotik sistemlerin sonuç değerlerinin istenildiği gibi olabilmesi için insan faktörü tarafından yapılacak işin giriş parametrelerinin doğru girilmesi ayrıca çevresel faktörlerinde (arazinin ve ürünün fiziki durumu, hava şartları vb.) iyi değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada tarımsal alanlardaki domates ürün

bilgilerinin görüntü işleme yöntemiyle analizini gerçekleştiren gezgin robot tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu robotik sistemin ana hedefi gezgin robot ile tarımsal ortam verileri (ortam sıcaklık ve nem, tarımsal ürün rengi, en ve boy) analiz edilerek çıktılar halinde arşivlenmesidir. Bu amaca yönelik olarak çeşitli elektronik ve mekanik elemanlar temin edildikten sonra gezgin robotun programlanması yapılmıştır [7]. Çalışmada, gezgin robot üzerindeki mikrodenetleyicili ana kontrol devresi, kullanıcı bilgisayarına usb ile bağlantılı mikrodenetleyicili kumanda devresi ve tarımsal ürün bilgisinin analiz edildiği görüntü işleme tekniği hakkında bilgi verilerek sistemin nasıl çalıştığı açıklanmıştır.

2. SİSTEM TASARIMI (SYSTEM DESIGN)

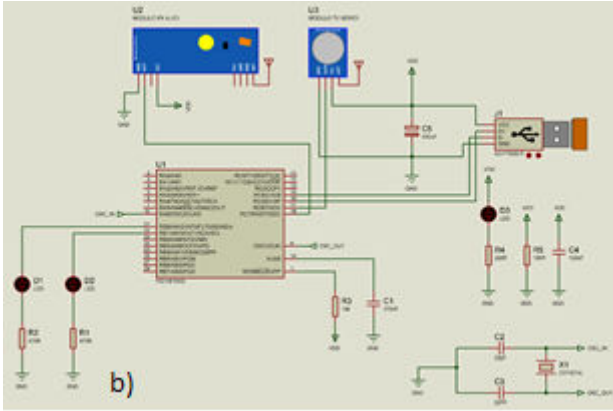
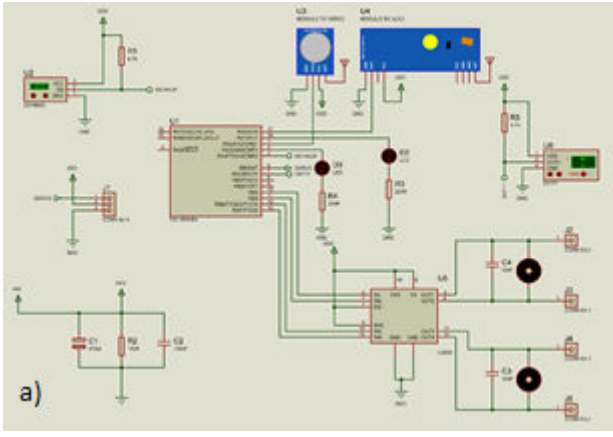
Sistem; görüntü, sıcaklık ve nem bilgilerinin alındığı algılayıcıların bulunduğu hareket edebilen gezgin robotik sistem ile görüntü işlemenin yapıldığı PC ye bağlı kablosuz iletişim kartından oluşmaktadır. Tasarlanan robotik sistemin blok diyagramı Şekil 1’de gösterilmiştir.



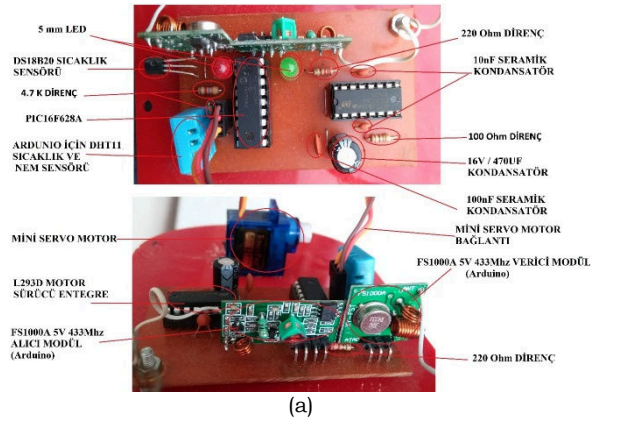
Şekil 1. Gezgin robotun blok diyagramı (Block diagram of the mobile robot)

2.1. Donanım Bölümü (Hardware Section)

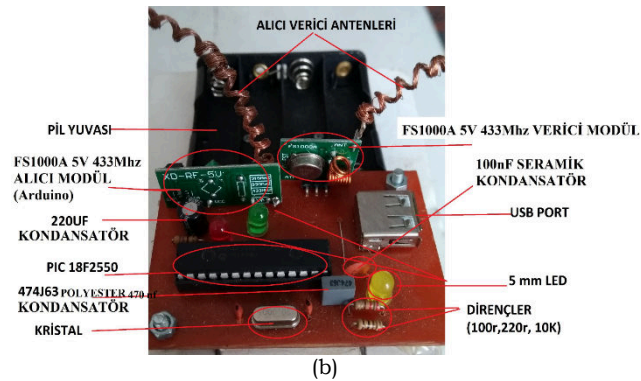
Tarımsal gezgin robotik sistemden alınan verilerin kullanıcı arayüz yazılımına aktarılması, kullanıcı tarafından verilen emirlerin robotik sistemde yerine getirilebilmesi için geliştirilen donanım sistem parçalarının tasarım ve gerçek görüntüsü Şekil 2’de ve Şekil 3’ de gösterilmiştir.



Şekil 2. (a)Ana modül kontrol kartı, (b)iletişim kartı tasarım çizimleri ((a) the main module control card, (b) communication card design drawings)



(a)



(b)

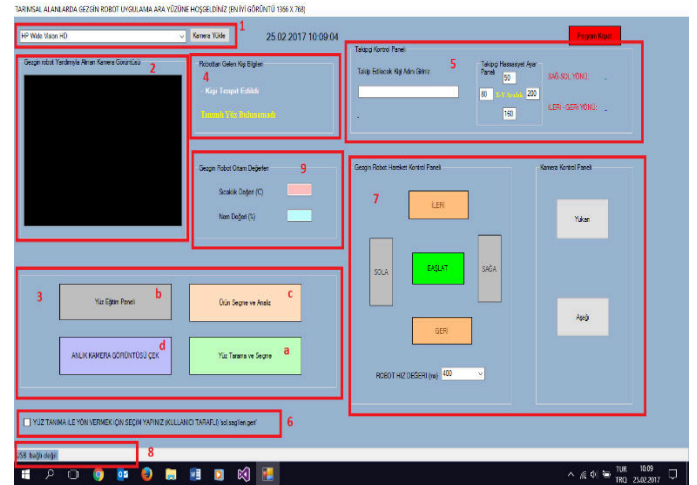
Şekil 3. (a)Ana modül kontrol kartı, (b) kablosuz iletişim kartı ((a) the main module control card, (b) the wireless communication card)

Ana modül kontrol kartı, ortamdaki elde edilen görüntü, sıcaklık ve nem verilerinin alınarak kablosuz iletişim kartına aktarılması ve iletişim kartından gelen kullanıcı tarafından iletilen kamera ve palet hareket komutlarının yerine getirilmesi amacıyla oluşturulmuştur.

Kablosuz iletişim kartı ise, robotik sistemden gelen verileri kullanıcı ara yüz yazılımına, kullanıcıdan gelen verileri de robotik sisteme aktarmak amacıyla oluşturulmuştur.

2.2. Yazılım Bölümü (Software Section)

Robotik sistemin bilgisayar kontrollü yazılım geliştirilmesinde "Microsoft Visual Studio 2013 Windows Forms Application" ortamında "C#" programlama dili kullanılarak yazılmıştır. Arayüz yazılımı en iyi 1366x768 çözünürlükte gözükmektedir. Program aynı anda birçok işlevi gerçekleştirmesi açısından kullanıcıya kolaylık sağlamaktadır. Programın kullanıcı arayüzü Şekil 4'de gösterilmiştir.

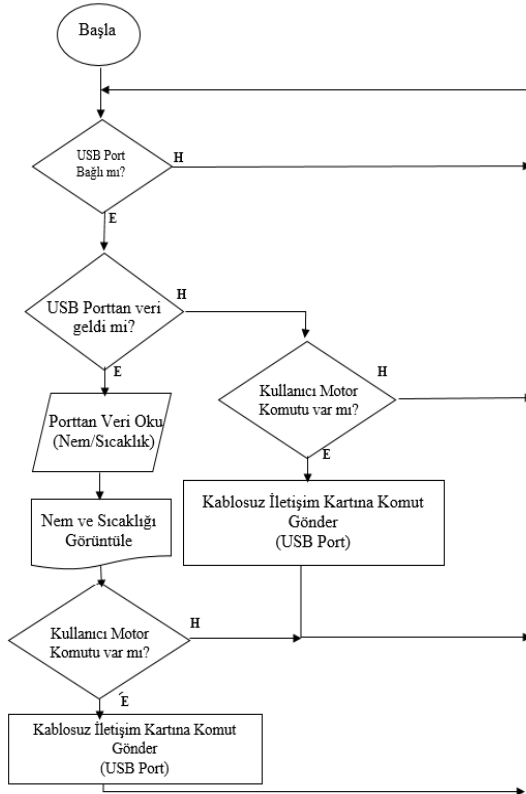


Şekil 4. Kullanıcı arayüz tasarımı (User interface design)

1 Numaralı alanda bilgisayara bağlı olan kameralar listelenir ve kamera kontrolü yapılarak istenilen cihaz tercih edilir. 2 numaralı alanda aktif kamera görüntüsü alınır. 3 numaralı alanda "a- Yüz Tanıma ve Seçme" aktif kameradan gelen görüntü üzerinde yüz tespit edilir ve eğer eğitim yapılmış yüz varsa ismi yazılır. "b- Yüz Eğitim Paneli" ile kameradan gelen görüntüden tespit edilen yüzler eğitime katılır yüz ile isim eşleştirilmesi yapılır. "c- Ürün Seçme ve Analiz" ile ürün renkleri, sınırları belirlenerek dış

ortamdan ayrılır ardından belirlenmiş ürün fiziki ölçüler, ortam sıcaklık ve nem bilgileri ile veri girişi yapılarak grafik oluşturulur. "d- Anlık Kamera Görüntüsü Çek" kameradan gelen görüntülerden anlık görüntü alınarak kullanıcı tarafından belirlenen dosya isim ve uzantısında (resim türü) kayıt işlemi yapılarak arşivlenir. 4 numaralı alan ile aktif kamerada tespit edilen yüz bilgileri yer almaktadır. 5-6 numaralı alanda kullanıcı taraflı yüz tanıma işlemi ile robot hareketi ve sahada bulunan kişinin hareket bilgisine göre gezgin robotun hareketi ve ayarların yapılabildiği paneldir. 7 numaralı alanda robot hareket ve kamera pozisyon emirlerinin verildiği ve ayarlarının yapılabildiği paneldir. 8 numaralı alanda kablosuz iletişim kartı ile PC arasındaki USB bağlantının olup olmadığının kontrolünün yapıldığı durum çubuğudur. 9 numaralı alanda gezgin robot ortamından gelen sıcaklık ve nem verilerinin gösterildiği bilgi panelidir.

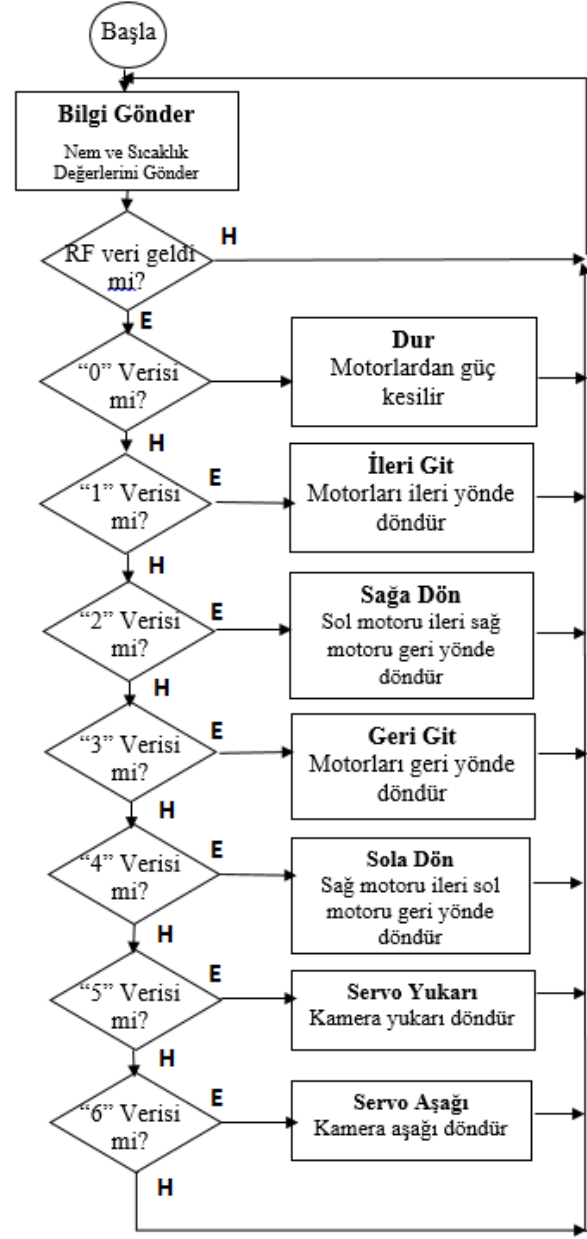
Tarımsal alanlar için tasarlanmış gezgin robotik sistemin, kullanıcı ara yüz yazılımı ile kablosuz iletişim kartı arasındaki veri gönderme-alma akış diyagramı Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Robotik sistemin akış diyagramları (Flow diagrams of the robotic system)

2.3. Gezgin Robotun Hareket Sistemi (Motion System of The Mobile Robot)

Robotun yazılımsal olarak algoritma tasarım çalışma mantığı sonsuz döngü ile başlamaktadır. Bu sonsuz döngü ile devamlı RF veri gönderme-dinleme (alma) işlemi yapılır ve gelen sinyallere göre motorlar kontrol edilir (Şekil 6).



Şekil 6. Gezgin robotun ana modül akış diyagramı (Main module flow diagram of mobile robot)

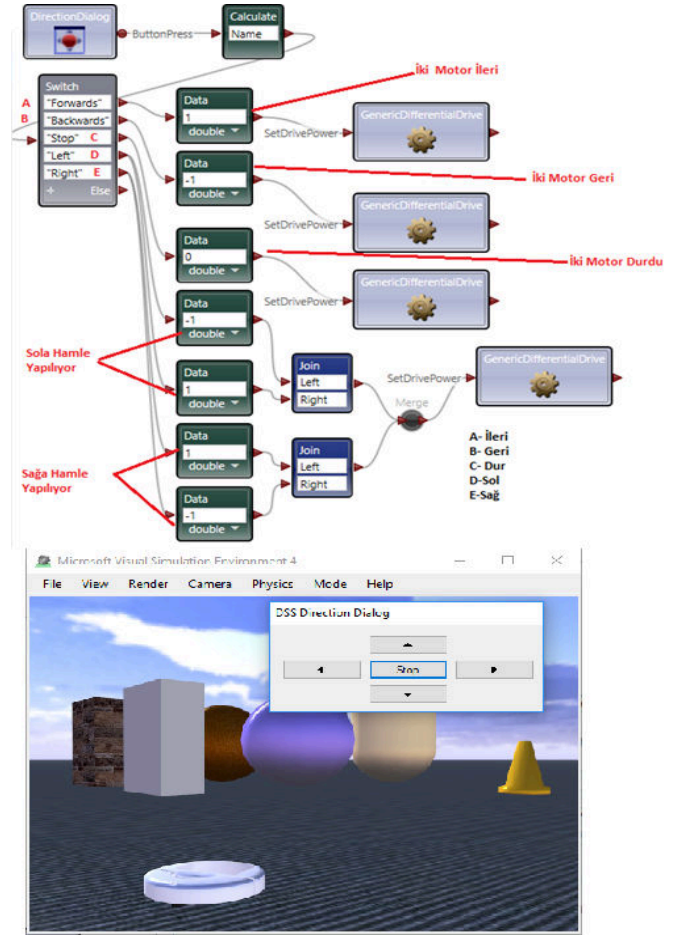
Ana kontrol kartına gelen veri eğer "1" ise motorlar ileri yönde döndürülerek robotun ileri gitmesi sağlanır. Aynı şekilde gelen veri eğer "2" ise sağ yönde, "3" ise geri, "4" ise de robot sola doğru hareketlendirilir. Robotik sistemin durması isteniyorsa motorlara "0" değeri gönderilerek motorlara güç verilmemektedir. Gelen veri "5" ise

servo motor uygun kare dalga sinyalleri ile sürülerek üst limite gelmediği sürece yaklaşık 15 derece yukarı döndürülür, "6" verisi geldiğinde ise yine alt limit kontrol edilerek yaklaşık 15 derece aşağıya döndürülür. Sıcaklık ve nem bilgisi sensörler ile okunarak bilgisayara bağlı olan alıcı devreye gönderilir. RF veri geldiğinde, bilgisayar kontrol ünitesindeki kullanıcı ara yüz yazılımı porttan gelen verileri alarak ekranda gösterilir. Ortamdan gelen kablosuz kamera görüntü verileri bilgisayar kullanıcı arayüzünde görüntü işleme yapılarak ürün hakkında bilgi elde edilmesi sağlanmış olur.

Robotik sistem hareket mekanizması değişik ortam şartlarında hareket edebilme kabiliyeti olması bakımından paletli tasarım yapılmıştır (Şekil 7). Robotik sistemde 2 adet DC motor kullanılarak "sağ" ve "sol" manevralarında teker (palet) yönleri zıt yönde dönerek dar alanlarda rahat hareket özelliği kazandırılmıştır. Robotik sistem hareket sisteminin "Microsoft Robotics Developer Studio 4" ortamında hazırlanmış simülasyon tasarımı Şekil 8' de gösterilmiştir.



Şekil 7. Palet hareket sistemi (Pallet movement system)



Şekil 8. Hareket sistemi simülasyonu (Motion system simulation)

Kullanıcı tarafından gezgin robotik sisteme gönderilen RF motor komut sinyalleri doğrultusunda hem palet hem de kamera hareketleri yapmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1. Gezgin robota gönderilen motor komutları ve yapılan görevler (Motor commands sent to mobile robot and tasks performed)

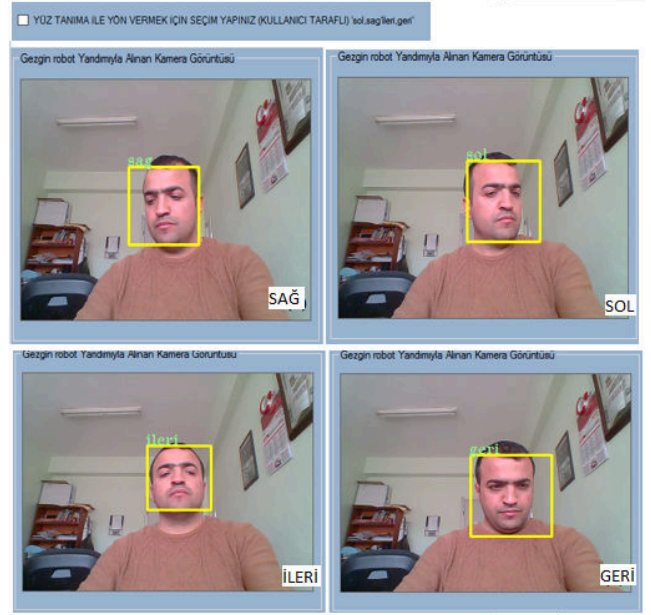
KOMUT	YAPILAN GÖREV
0 •	Robot Durdurulur
1 ↑	Robot İleri Yönde Gider (+sol,+sağ motor)
2 →	Robot Sağa Döner (+sol,-sağ motor)
3 ↓	Robot Geri Yönde Gider (-sol,-sağ motor)
4 ←	Robot Sola Döner (-sol,+sağ motor)
5 ↑↑	Kamera Açısı Bir Kademe Yukarı
6 ↓↓	Kamera Açısı Bir Kademe Aşağı

Gezgin robotun hareket sistemi kullanıcı buton kontrolleri ile hareket kabiliyetine ek olarak yüz tanıma kullanılarak farklı iki şekilde hareket ettirilebilmektedir. Bunlar, kullanıcı tarafı

kamera yüz tanıma ve robot kamerası yüz tanıma şeklindedir. Kullanıcı tarafı yüz tanıma ile büyük tarımsal araştırma merkezlerinde engelli vatandaşların oturdukları yerden yüz ifadeleri ile robotu hareket ettirebilmeleri sağlanırken, robot tarafı kamera ile hareket sisteminde ise tarımsal alanlarda çiftçilerin taşıma işlemlerini otomatik yaptırabilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda popüler tanıma algoritmaları incelendiğinde; özgün yüz ile temel bileşen analizi, doğrusal ayırt etme analizi, elastik yığın grafiği eşleştirme balık yüzü, gizli markov modeli ve nöronal motive dinamik bağlantı eşleştirmesidir [8].

Çalışmada gerçek zamanlı çoklu yüz tespit ve tanıma işleminde C#.Net ortamında "EmguCV" kütüphanelerinden faydalanılarak "haar cascade" yöntemi kullanılmıştır [9]. Eğitimlerde kullanılması için "haarcascade_frontalface_default.xml" eğitim dosyası kullanılarak görüntü işleme gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, kamera aygıtından gerçek zamanlı görüntü üzerinde yüzler tespit edilir, eğer yüz sisteme kayıt edilecekse çalışma dizininde oluşturulmuş "Eğitim" klasörü içerisine bitmap olarak kayıt edilir. Kayıt edilen yüzler karşılaştırma için OpenCV algoritmalarından Eigenfaces algoritması eğitim yöntemi olarak kullanılmıştır. Bu işlemlerin ardından yüz tespit işlemi ile robotik sistem aşağıdaki gibi hareket ettirilir. Bunlar;

- Kullanıcı tarafı yüz tanıma, kullanıcı tarafında bilgisayar kamerasında yüz hareketlerine göre eğitim yapılarak yön isimleri verilir. Bu işlemin ardından yön isimlerine (sol, sag, ileri, geri) eşleştirilmiş yüz ifadesi tanındığında robot motorlarına o yönde komut gönderilerek hareket sağlanmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Kullanıcı tarafı yüz tanıma ile yön hareketi (Directional movement with user-side face recognition)

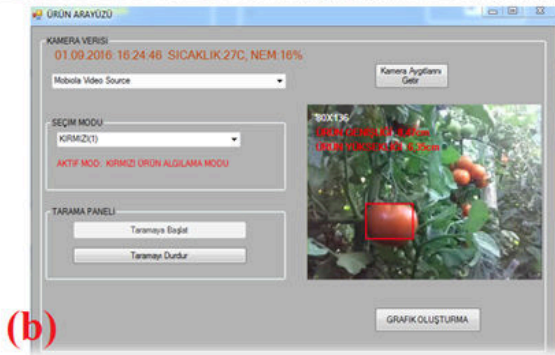
- Robot kamerasından alınan yüz tanımlamasına göre, gerçek zamanlı alınan görüntüden daha önce tanımlanmış kişilerin tanımlanması yapılır ve takip edilecek kişinin ismi yazılır, ardından ekran üzerinde X-Y çözünürlük aralıkları belirlenerek yüzün bulunduğu konuma göre alan sınırlaması yapılır. Bu işlemin ardından takip edilecek kişinin X-Y çözünürlük sınır limitlerinde yapmış olduğu ihlal neticesinde robotik sistem "sağ-sol ve ileri-geri" hareket emirlerini otomatik olarak yerine getirmeye çalışır (Şekil 10).



Şekil 10. Gezgin robotun yüz tanıma göre otomatik hareket etmesi (Automatic movement of the mobile robot according to face recognition)

2.4. Ürün Tespit ve Analiz (Product Detection and Analysis)

Gezgin robotik sistemde bulunan kablosuz kameradan kullanıcı yazılımına gelen görüntüler işlenerek elde edilen ürün fiziksel bilgilerinden grafiksel raporlar oluşturularak, kullanıcıların zaman aralıklarında aynı veya farklı cins aynı tür meyvelerin gelişim verisi raporları oluşturulur. Meyve tespit işleminde renk ayırt edici faktör kullanılarak renk tespiti ve takibi yönteminden faydalanılmıştır [10] [11]. Geliştirilen yazılımda renk tespit işlemi için "AForge kütüphanesi" kullanılmıştır. Seçim yapılan kameradan alınan görüntü "frame" leri "AForge.Imaging.Filters" kütüphanesinde renk filtrelemesi uygulanarak "PictureBox" nesnesi üzerinde çerçevesi çizilerek gösterimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 11).



Şekil 11. Robotik sistemde meyve tespiti (Fruit detection in robotic system)

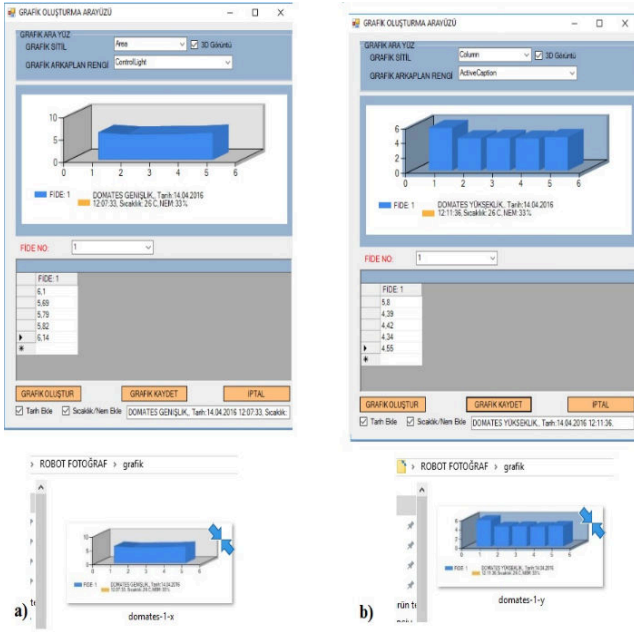
Robotik sistemler kullanılarak görüntü işleme tekniği ile ürün tespit işlemleri için literatürde ki çalışmalar öncelikle incelenmiş, ilk olarak iç mekân ortamında farklı ışık ve açılarda nesnelere üzerinde denemeler yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından gerçek tarımsal alanlarda denemeler

yapılmıştır. Bu denemeler sonucunda oluşan veriler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Gerçek tarımsal alanlarda farklı domates meyvesi için yapılan denemeler (Experiments for different tomatoes in real agricultural areas)

No	Sonuç görüntüsü (İki farklı kamera)	Açıklama
1		Işık (güneş) etkisi olmuştur. Genişlik ölçüsünde yüksek oranda başarı alınmıştır.
2		Işık (güneş) ve farklı cisim (yaprak) etkisi olmuştur. Yükseklik ve genişlik bilgisi hatalı alınmıştır.
3		Işık (güneş) etkisi olmuştur. Genişlikte yüksek oranda başarı alınmıştır.
4		Işık (güneş) ve farklı cisim (yaprak, meyve) etkisi olmuştur. Yükseklik ve genişlik bilgisi hatalı alınmıştır.
5		Işık (güneş) etkisi olmuştur. Yükseklik ve genişlik bilgisi ışık doğrultusunda hatalı alınmıştır.
6		Işık (güneş) etkisi az olmuştur. Genişlik ve yükseklik bilgisi az hata ile alınmıştır.

Analiz sonuçları kullanıcıya ürün boy-genişlik (kesit alanı) ve renk doygunluğu (RGB) bilgisi verirken, grafik oluşturma ekranında kullanıcı isterse tespit edilen ürün bilgilerine ek olarak tarih, sıcaklık, nem ve açıklama ekleyerek tercih ettiği grafik çeşidine göre kayıt işlemi jpeg resim dosyası yaparak arşiv oluşturabilir. Gezgin robotik sistem kamerasından elde edilen görüntülerin işlenmesi ile tespit edilen meyvelerin analiz listesi ve grafik oluşturma işlem örneği Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Ürün tespit işlemi sonucunda analiz ve grafik oluşturma (kayıt)*a) bir fidedeki beş adet domates genişliği b) bir fidedeki beş adet domatesin yüksekliği (Analysis and graphic creation (save) as a result of product detection process *(a) the width of five tomatoes on one seedling, b) the height of five tomatoes on one seedling)

Çalışmada, gerçek domates nesnelere ile yapılan denemelerde farklı domates renk tonlarının (Şekil 13.) kullanıcı tarafından bilinmesi ve yükseklik- genişlik oranlarına göre daha önceden elde edilen veri listesi kullanılarak ağırlık tahmini için kullanıcıya bilgi ekranı sunulmuştur.



Şekil 13. Farklı renk tonlarına sahip domatesler (Tomatoes with different color tones)

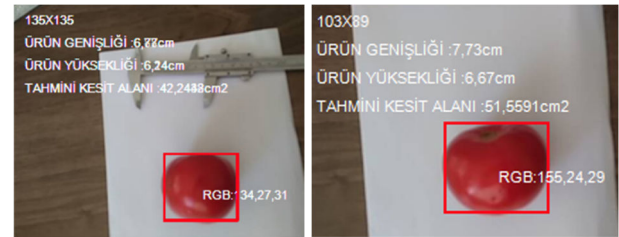
Geliştirilen sistemde domates renk tonu, domatesin merkezi noktasından alınan piksel RGB bilgisinden elde edilirken (Şekil 14.), ağırlık tahmini ise domates üzerindeki çerçevenin alan bilgisi referans alınarak daha önceden oluşturulmuş excel tablosundaki veri listesi kullanıcı tarafından kıyaslanarak elde edilmektedir. Çalışmada, renk filtrelemesi için

kullanılan RGB aralığı Tablo 3'de gösterilmiştir. Yazılımda filtreleme RGB aralığı değiştirilerek kırmızı renk ton aralığı daraltılabilmektedir

Tablo 3. Çalışmada kullanılan kırmızı ton aralığı örneği (Red tone range used in the study)

Renk Paleti	Red (100-255)	Green(0-75)	Blue (0-75)
	*Sınır ve orta renk tonu örnekleri		
	100	75	75
	100	0	0
	125	38	38
	255	0	0
	255	75	75

Kıyaslamada kullanılan domates veri listesi, domates kasalarından ratgele seçilen bir kasa içerisinde sıra ile ölçümler yapılarak elde edilmiştir. Ölçümlerde, kumpas ile en ve boy kesit ölçüleri kullanılarak alan bilgisi, terazi kullanılarak ise ağırlık bilgisi elde edilmiştir. Veri listesinde alan bilgisi ile ağırlık ilişkisi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu liste oluşturulduktan sonra veriler, excelden kullanıcı arayüzüne yazılım ile aktarılmıştır. Veri listesi oluşturulurken şekilsel bütünlüğe bakılmadan domatesler rastgele alınarak elde edilmiştir. Bu işlem sonucunda aynı kesit alanına sahip farklı ağırlık değerlerinin olduğu görülmüştür (Şekil 15. 46 ve 20 numuneler). Şekil bütünlüğü olan numunelerin kesit alanlarının sonucunda gerçek ağırlık oranları birbirine yakın olduğunda veri listesinde görülmektedir (Şekil 15. 39 ve 48 numuneler).



Şekil 14. Tespit edilen domateslerin kesit alan ve RGB renk bilgisi (The cross-sectional area and RGB color information of the detected tomatoes)

Şekil 15. Daha önce oluşturulmuş gerçek domateslerin (farklı şekillerde) veri listesi (Data list of previously created real tomatoes)

Kullanıcı veya çiftçi, tespit edilmiş domates meyvesi üzerinde hem renk doymunluk oranını hemde kesit alanını rahatlıkla kullanıcı arayüzünden görebilecektir. Kullanıcı isterse daha önce rastgele domateslerden oluşturulmuş olan domates veri listesi ile elde edilen yeni değerleri kıyaslayabilecektir. Robotik sistem ile uzaktan araziye gitmeden tahmini olarak kullanıcıya, meyve daldan kopmadan olgunlaşma renginin tonunu ve tahmini ağırlığını verecektir. Kullanıcı sistem yazılımı içerisinde bulunan veri listesi paneline başka excel tablolarını ekleyebilir, istediği verileri üzerinde değişiklikler yapabilmektedir.

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)



Bu çalışmada tarımsal alanlarda hassas tarıma yönelik teknoloji kullanımında, bilgisayar sistemi ile gezgin robot birlikte kullanılmıştır. Geliştirilen gezgin robot için, bilgisayar sisteminden kontrol ve görüntü işleme denemeleri yapılmıştır. Literatürde genellikle iç ortamlarda belirli platformlarda yapılan denemelerin aksine gerçek ortamlarda gezgin robot ile tarımsal ürün tespit işleminin yapılabildiği görülmüştür. Yapılan analiz işleminde domates meyvesi ve ortam koşulları sorunsuz olması durumunda (ortam aydınlatması, gölgelenme, şekil bozukluğu vb.) ürün hasat gelişim evresine göre renk doymunluk tespiti ve veri setine göre ağırlık tahmini %80 değerinin üzerinde olduğu görülmüştür.

Sanayide büyük değişimlerin (Endüstri 4.0) yaşandığı günümüz de, tarımsal alanlarda da teknoloji gelişimine yönelik yapılacak yeniliklere ek olarak bu sistem hem yazılımsal hemde mekanik olarak geliştirilip tam otonom özellik yapıldıktan sonra kullanıcının kontrolüne gerek kalmadan tarımsal alanlarda hasat yapılacak bitki

meyvesi ile ilgili istatistiki bilgi alınabilir, hasat miktarı ve verim durumları otomatik rapor edilebilir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Anonymous, «A Brief History of Robotics,» 2008. [Çevrimiçi]. Available: <http://robotics.megagiant.com/history.html>. [Erişildi: 14 Nisan 2017].
- [2] Anonim, «Robot Sitesi,» Boğaziçi Üniversitesi, 2009. [Çevrimiçi]. Available: http://robot.cmpe.boun.edu.tr/593/history/1_Giri_s_c.html. [Erişildi: 14 Nisan 2017].
- [3] N. Yıldız ve T. Uzun, «Araba Benzeri Bir Gezgin Robotun Donanımı ile Yazılımının Tasarlanması ve Gerçekleştirilmesi,» %1 içinde *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 2004.
- [4] E. Kahya, Elma ve Kivi Çeşitlerinin Hasada Yönelik Özelliklerinin Saptanması ve Robotla Hasat Olanakları, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ,2012.
- [5] O. Çelik, E. Yiğiter ve H. Sedef, «Kablosuz Ağ Tabanlı Gezgin Keşif Robotu: Kaşif,» %1 içinde *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği 13. Ulusal Kongresi ve Fuarı*, İstanbul, 2009.
- [6] A. B. Tekin ve A. Değirmencioğlu, «Tarımsal Bilişim: İleri Tarım Teknolojileri,» %1 içinde *XII. Akademik Bilişim Konferansı*, Muğla, 2010.
- [7] D. Özdemir, Gezgin Robotların Çiftliklerde Ürün Yeri Belirleme ve Taşıma İşlemlerinde Kullanımı, Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 2009.
- [8] I. Marqu'es, «Face Recognition Algorithms,» 16 Ocak 2010. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.ehu.es/ccwintco/uploads/e/eb/PFC-IonMarques.pdf>. [Erişildi: 21 Temmuz 2017].
- [9] S. A. G. Rojas, «Multiple face detection and recognition in real time,» 2015. [Çevrimiçi]. Available: <https://www.codeproject.com/Articles/239849/Multiple-face-detection-and-recognition-in-real>. [Erişildi: 23 Nisan 2017].
- [10] U. Yalçın, «C# ile Renkli Nesne Takibi – Color Tracking,» 2011. [Çevrimiçi]. Available: <http://uguryalcin.org/wordpress/?p=372>. [Erişildi: 26 Nisan 2017].
- [11] S. Şos, «Mavi Renkli Nesnelere Takip Edebilen C# Projesi,» 2016. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.koddunyam.com/2016/08/mavi-renkli-nesnelere-takibi-projesi-c.html>. [Erişildi: 25 Nisan 2017].

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 20-04-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 30-01-2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.305595	

Tavuk gübresi ve tarımsal atıkların biyoyakıt karakterlerinin incelenmesi

Alper Er¹, Saim Özdemir*¹

ÖZ

Kümes atıkları, yerel tarımsal kaynaklı atıklarla karıştırılarak yakıldığında, kümeslerde alan ısıtma amaçlı, cazip alternatif enerji kaynağı olmaktadır. Bu çalışmada, kümesler boşaltılıp temizleme aşamasında kümes altlık örnekleri toplanmış ve enerji içerikleri, yanma gaz emisyonları ve kül karakteristikleri incelenmiştir. Ağaç talaşı, fındikkabuğu, mısır sapı ve çeltik kavuzu, tavuk gübresinin yakılmasında yanma ve emisyonları iyileştirme amacıyla, ayrıca incelenmiştir. Tavuk kümes altlığının alt ve üst ısıl değeri sırası ile 3100 – 3500 kcal/kg olarak tespit edilmiş, kuru ağırlık bazında kül miktarı % 19.4 olarak bulunmuştur. Külde en fazla bulunan mineral P₂O₅ olmuştur. Kümes altıklarının yakılması, yanma gazı emisyon limit değerlerini, en problemlili NO_x emisyonları dahil, sağlamıştır. Enerji değeri ve yanma gazı emisyonları olarak tarımsal atık maddeler, kümes atıklarından daha iyi değerler vermiştir. Çalışmada elde edilen bulgular, tavuk gübresi ve tarımsal atıkların kombine edilerek, ekonomik olarak uygun, enerji değeri yüksek biyokütle yakıtı üretilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: tavuk gübresi, enerji içeriği, yanma gazı emisyonları, kül içerikleri

Investigation of biofuel characteristics of poultry litter and crop residues

ABSTRACT

Burning poultry litter to provide energy for space heating in broiler houses has been viewed as an alternative renewable energy, especially when combined with local crop residues. In the present study, litter samples were obtained from a local broiler farm following clean-out to evaluate the energy content, exhaust gas emissions and characteristics of ash following combustion. Wood sawdust, hazelnut shell, corn stalk and rice husk were also evaluated as a possible co-combustion with poultry litter to amend combustion and emissions. The low and high heating values of the litter was 3100 – 3500 kcal/kg, respectively, and had an ash content of 19.4% on dry basis. The predominant ash mineral in the litter was P₂O₅. The emission values of poultry litter combustion was consistent with the exhaust gas limits, including the NO_x. The energy content and exhaust gas emissions of crop residues were better than the poultry litter. According to the results, economically feasible and high energy containing biomass fuel can be produced by combining poultry litter and crop residues.

Keywords: poultry litter, energy content, exhaust gas emission, ash characteristics

* Corresponding Author

¹ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sakarya, saimo@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tavuk kümeslerinin sayı ve kapasitesinde artışa bağlı olarak her geçen gün daha fazla miktarda altlık atığı ortaya çıkmaktadır. Bu atık, yaygın olarak çevredeki tarım alanlarına gübre kaynağı olarak bertaraf edilmektedir. Araziye serilen atık, koku, su kaynaklarına kirlilik ve patojen yayılımı gibi çevresel açıdan risk oluşturmaktadır. Biyolojik kökenli kaynakların alternatif kullanım şekillerinden birisi de yenilenebilir kaynak olarak enerji üretiminde kullanılmasıdır [1]. Biyokütle kaynaklarının işlenerek, enerji değeri yükseltilmiş, kullanımı kolaylaştırılmış, modernize edilmiş formu ise pellettir [2]. Biyoyakıtlar, hammaddenin yerel kaynaklardan kolayca temin edilebileceği, ucuz ve fosil yakıtlara göre daha temiz ve yenilenebilir enerji kaynaklarından [3]. Biyokütle, dünyada enerji talebinin % 10'u ile 15'i arasında bir paya sahiptir ve Avrupa birliğinde bu oranın 2020'ye kadar çevreci politikaların uygulanması ile % 20'lere kadar yükseltilmesi hedeflenmektedir [4]. Depolanabilir ve kullanıma hazır, yenilenebilir enerji kaynağı olması nedeniyle biyokütlenin gelecekte önemli enerji kaynaklarından biri olması beklenmektedir. Örneğin Finlandiya enerjisinin % 20'sini, İsveç %16'sını, Avusturya %13'ünü biyokütleden elde etmektedir [5]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, ülkemiz enerji gereksiniminin büyük bölümünü ithalat yoluyla karşılamakta ve oran giderek artmaktadır. Enerji ihtiyacının karşılanmasında, biyoyakıtlar potansiyeli en yüksek kaynağı oluşturmaktadır [6].

Ormancılık atık ve artıkları, kereste endüstrisi artıkları, tarımsal ürün hasat artıkları ile özel olarak yetiştirilmiş enerji bitkisi biyokütleleri, en kolay ve enerji verimli olarak pellet yapıldıktan sonra kullanılabilir. Biyokütlelerin pellet yapılarak kullanılması, enerjiyi küçük hacimde yoğunlaştırdığından, diğer enerji türlerine karşı kalitesi düşük olsa da avantajlı hale getirmektedir [7]. Pelletler 6 ila 8 mm çapında, 10 ila 12 mm uzunluğunda sıkıştırılarak yoğunluğu ve enerji verimliliği artırılmış silindirik şekilli maddelerdir. Kuzey Amerika ülkeleri olan ABD ve Kanada'da yılda 2 milyon tonun üzerinde, Avrupa ülkelerinde yılda 10 milyon ton civarında üretim yapılmaktadır. Piyasaya sürülen pelletler konut ve iş yeri ısıtmalarında, bireysel soba ve katı yakıt kat kaloriferlerinde, öğrenci yurtlarında ve kimi küçük ve orta büyüklükteki işletmelerde proses suyu

ısıtmalarında da kullanılmaktadır. Kanada gibi büyük üretici ülkelerden Avrupa ve Asya ülkelerine dış ticareti de yapılmaktadır. Özellikle ticaret söz konusu olduğunda standartlar ön plana çıkmakta ve pelleti aktif olarak kullanan ülkelerde üretim, taşıma ve paketleme işlemleri için belli standartlar bulunmaktadır. Dış ticarete standartları daha sıkı olan AB International Pellet Standard DIN 51731 dikkate alınmaktadır.

Türkiye'de, son yıllarda kümes ve çiftlik hayvanlarından kaynaklanan hayvansal atıklar, en önemli ve en ciddi çevresel problemler arasında yer almaktadır. Kümes hayvanı atıkları eğer uygun bir şekilde yönetilmezse ana çevresel sorunlardan birini oluşturabilir [8]. Tavuk gübresi geleneksel olarak arazilere gübre olarak kullanılırken, sürekli artan miktarda ortaya çıkışları alternatif bertaraf sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Alternatif bertaraf yöntemlerinden birisi de direk yakma işlemidir. Bu işlem hem çevresel açıdan uygun, ekonomik bertaraf sağlamakta, hem de enerji üretimi, ortam ısıtılması ve hatta kaynaklandıkları kümeslerin ısıtılmasına imkan sağlamaktadır [9]. Belli bir enerji değeri olmakla birlikte, tavuk gübresinin sahip olduğu kimi özellikler efektif yanma ve enerji verimliliğini kısıtlamakta iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Üretim miktarı ve neden olduğu çevresel problemler bir arada düşünüldüğünde, tavuk gübresi biyoyakıt olarak değerlendirilebilecek en önemli kaynaklardan birini oluşturmaktadır [8]. Bulunabilirliği yüksek olmakla birlikte, tavuk gübresi, yüksek rutubet oranı, kül miktarı ve mineral kompozisyonu nedeniyle tek başına verimli bir şekilde yakılamamaktadır [10]. Sakarya bölgesinde fazla miktarda tarımsal kökenli artık ve atık da ortaya çıkmakta ve biyoyakıt olarak değerlendirilme potansiyeli taşımaktadırlar. Nitekim benzer tarımsal kökenli atıklar farklı çalışmalara konu olmuş, enerji potansiyeli ve çevresel emisyonlar bakımından değerlendirilmiştir. Alamsyah ve ark. pelletleme amacıyla palmye kabuğu, küspe, soya fasulyesi sapları, çeltik ve mısır sapı gibi atıkları incelemiştir. Analizlerinde kullandıkları pelletlerinin emisyon değerlerini yasal sınırlar içerisinde olduğunu tespit etmişler, ayrıca pellet kaliteleri de DIN 51731 standartlarına uygun bulunmuştur [11]. Kraszkiewicz ve ark. selüloz içerikleri % 31.8 ile 42.64 arasında değişen 6 farklı tarımsal atık ile yaptıkları çalışmada selüloz içeriği ile pellet dayanımı arasında negatif lineer ilişki

tespit etmişler, kalorifik değerle herhangi bir ilişki gözlemlenmemişlerdir [12].

Tavuk gübresinin ısı değerleri farklı çalışmalarda ortaya koyulmakla birlikte, lingo-selülozik ham maddelerle düşünülerek değerlendirildiği çalışmalara tarafımızdan rastlanılmamıştır. Tavuk gübresi, yerel kaynaklardan temin edilebilen diğer biyoyakıt kaynakları ile kombine edilerek kullanılabilir ve biyoyakıt haline getirilebilir. Tavuk kümesleri ısıtma amaçlı fazla miktarda yakıtı ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada Sakarya bölgesinde fazla miktarda var olan ve biyoyakıt üretilerek ortam ısıtmasında kullanılacak atıkların yakıt özellikleri araştırılmış ve çevresel emisyonlar bakımından değerlendirilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHODS)

Çalışmada bölgesel olarak yaygın olan ve ulaşılması kolay olan organik atıkların biyokütle kaynağı olarak yakmada kullanılması amaçlanmıştır. Tavuk gübresi, Sakarya bölgesinde broyler üreticiliği yapan kümeden, küme yetiştirme döneminin sonunda kümesler boşaltıldıktan sonra alınmıştır. Tavuk gübresi altlık olarak çeltik kavuzu içermektedir. Çalışmada incelenen diğer tarımsal kökenli artık ve atıkları teşkil eden ağaç talaşı, fındikkabuğu, mısır sapı ve çeltik kavuzu yine bölgeden temin edilmiştir. Çeltik kavuzu, kümeslere altlık olarak kullanılan üründen alınmıştır. Fındikkabuğu kümeslere ısıtma kaynaklı yakıt olarak satılan ticari üründen temin edilmiştir. Ağaç talaşı yine bölgede hızar atölyesinden temin edilmiştir. Mısır sapı, mısır hasat edildikten sonra tarlada kalan sap ürününden temin edilmiş, kullanılmak üzere değirmen ile küçük parçalara öğütülmüştür.

Ürünler ayrı ayrı havada kurutulmuş, ardından pellet haline getirilmiştir. Pellet haline getirilen ürünlerin kalorileri, yanma kaynaklı emisyon gazları ve yakıldıktan sonra geriye kalan külün mineral kompozisyonu analiz edilmiştir. Ürünlerin enerji değerleri ve yanma gazları analizleri akredite laboratuvarında pellet ürünlerde yapılmıştır.

Nem miktarı, numuneler 105 °C de sabit tartıma getirilene kadar kurutulmuş ve ağırlık farkı formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Rutubet oranı bulunan numunelerden örnekler alınarak

krozelerde, 550 °C de tam yanma sağlanana kadar (~4 saat) yakılmış ve yine ağırlık kaybı farkı formülü kullanılarak uçucu madde ve kül miktarı tayin edilmiştir. Numunelerin kalori tayini Bomp kalorimetre ile yapılmıştır. Bu yöntemde numuneler sabit hacimli kalorimetre bombası denilen çelik bir kaba konur ve yanma gerçekleştirilir. Yanma reaksiyonu ile üretilen ısı, suyun sıcaklığındaki yükselmeyi kaydederek hesaplama yapılır ve sonuçlar kcal/kg olarak ifade edilir.

Yanma gazları, biyokütle yakıtlar için uzmanlaşmış kurumda ölçülmüştür. Yanma gazından kaynaklanan emisyonların belirlenmesi için taşınabilir Gaz Analiz Cihazı (TESTO 350 M XL-454) kullanılmıştır. Pelletleniş numuneler test yakıcısında yakılma esnasında, atık gaz kompozisyonundaki O, CO₂, CO, SO₂ ve NO_x emisyonları, yanma süresince on-line olarak ölçülmüş ve ortalamaları verilmiştir.

Kül oranını belirleme analizlerinde ortaya çıkan kül numuneleri, kül kompozisyonunu belirlemek için kullanılmıştır. Yaklaşık 100 mg kül numunesi 6 ml HNO₃ (%65), 1 ml H₂O₂ (%30) asit karışımında çözündürülmüş, ultra saf su eklenmiş ve ardından element kompostonu ICP-OES (Spectro Arcos, Kleve, Germany) cihazında ölçülmüştür. Si ultra saf suda çözündürülerek ölçülmüştür.

İncelenen biyoyakıt örneklerinde her bir parametre üçer tekerrürlü olarak ölçülmüştür. Uygulamalar arası farklılıkları ortaya çıkarmak için varyans analizi yapılmıştır. İstatistikî analizler Statgraphics programı ile yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Çalışmada incelenen tavuk gübresi ile ona karışım olarak düşünülen tarımsal atıkları ve ağaç talaşının enerji değeri analizleri Tablo 1'de verilmiştir. Biyokütle malzemelerinin enerji değerleri maddelerin sahip olduğu fiziksel ve kimyasal bileşime bağlı olarak değişmektedir. Enerji değerinde birinci derecede belirleyici olan rutubet oranı kurutulmuş ayarlanabilir ve ürünün enerji seviyesi yükseltilebilir, fakat kimyasal bileşim değiştirilemez. Sadece farklı biyokütle maddelerinin karışım oranları ayarlanarak optimize edilebilir.

Table 1. Çalışmada incelenen biyokütle kaynakları ve enerji değerleri ve ilgili özellikleri. (Biomass energy sources evaluated in the study and their properties related to the energy values)

Parametre	Tavuk Güb.	Ağaç talaşı	Fındık kab.	Mısır sapı	Çeltik kav.
C (%)	27.2	44.2	47.60	49.08	45.50
H (%)	3.7	2.8	5.07	5.72	5.29
O (%)	23.1	18.3	24.51	36.59	42.5
N (%)	3.7	0.22	0.26	0.49	0.39
S (%)	0.3	0.02	0.03	0.09	0.04
Kül (%)	19.4	3.7	4.49	7.16	6.32
Rutubet (%)	26.2	52.6	10.12	11.62	8.68
Üst ısıl (kcal/kg)	3500	4850	4517	4287	4074
Alt ısıl (kcal/kg)	3100	4350	4238	3817	3765

Tablo 1'de görüldüğü gibi, tavuk gübresi gibi biyokütle kaynaklarının biyoyakıt olarak kullanımının önündeki en önemli engeller düşük hacim ağırlığı yanında, nem içeriği ve yüksek kül oranıdır [13]. Çalışma kapsamında incelenen kümes atıklarının, rutubet içeriği % 26.2 olarak tespit edilmiş, kül içeriği ise % 19.4 olarak bulunmuş ve alt ısıl değeri ile üst ısıl değerleri de 3100-3500 kcal/kg olarak tespit edilmiştir. Tavuk gübresi ile kıyaslandığında ağaç talaşı, fındık kabuğu, mısır sapı, çeltik kavuzunun kül ve rutubet değerleri daha düşük seviyelerde gerçekleşmiş ve bu nedenle alt ve üst ısıl değerleri daha yüksek kalori değerleri vermiştir. Literatürde 3000-4000 kcal/kg olarak verilen kümes atıklarının kalorifik değeri, kömürün kalorifik değerinin yaklaşık yarısıdır [14]. Benzer şekilde bu çalışma kapsamında incelenen kümes atıklarında enerji değeri 3100-3500 kcal/kg olarak tespit edilmiştir. Düşük kalorifik değerine rağmen kümes atıkları, ABD ve AB ülkelerinde yenilenebilir enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Diğer biyokütle enerji kaynakları ile beraber kalorifik değer ve yanma özellikleri iyileştirilebilir ve özellikle kümeslerin ısıtılmasında yakıt kaynağı olarak kullanılabilir nitelikler kazandırılabilir.

Tavuk gübresinin mineral içeriği yüksektir ve diğer biyoyakıt alternatifleri ile karşılaştırıldığında en yüksek olan element azot olmuştur. Yüksek azot içeriği nedeniyle, yakma söz konusu olduğunda NO_x emisyonları en önemli çevresel problem kaynağı olmaktadır. Yapılan bu çalışmada NO_x emisyonu 155 ppm olarak bulunmuş ve bu değer sanayi kaynaklı hava kirliliğinin kontrolü SKHKK [15] limit değerleri ile karşılaştırıldığında 300 ppm olan sınır değerinin oldukça altındadır (Tablo 2). Yine tavuk gübresinin sülfür içeriği, incelenen diğer biyokütle yakıt kaynaklarından daha yüksek

bulunmuştur. Yakıtın yüksek kükürt içeriğinin SO_x emisyonlarını yükseltme potansiyeli bulunmaktadır. Yüksek sülfür içeriği yanma gazı emisyonlarını yükseltirken yakma ünitelerinde korozyon problemine de neden olabilmektedir.

Table 2. Broyler kümes altlığı yanma gazı emisyonlarının, yerel biyoyakıt kaynakları ile karşılaştırılması. Exhaust gas emissions of broiler litter compared to the locally available biomass sources)

Parametre	Tavuk Güb.	Ağaç talaşı	Fındık kab.	Mısır sapı	Çeltik kav.
O ₂ (%)	18.42	18.33	18.21	18.37	18.28
CO ₂ (%)	2.45	2.46	2.31	2.53	2.43
CO (ppm)	1222	1089	1006	1172	988
NO (ppm)	148	55	57	126	87
NO _x (ppm)	155	67	60	137	102
SO ₂ (ppm)	8.25	6.34	7.54	5.10	4.51

Çalışmada yanma gazı olarak ölçülen O₂, CO₂ ve CO konsantrasyonları uygulamalar arasında istatistiki olarak bir farklılık göstermemiştir. Yanma sıcaklıkları, yanma etkinliği ve yakıtın oksijen içeriği tam oksidasyon sağlayarak eksik yanmanın önüne geçmekte ve dolayısıyla CO ve CO₂ emisyonlarının da yükselmesinin önüne geçmektedir [16]. Bu nedenle test biyoyakıt kaynaklarının yanma gazları farklı bulunmamıştır. Biyokütle yakıtlar 600 - 800 °C arasında yakılmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda yakılan fosil yakıtlar gibi yanma esnasında havanın azot gazından kaynaklı NO_x emisyonu oluşması riski düşüktür. Biyokütle yakıtlarının NO_x emisyonu sahip oldukları azot içeriğinden kaynaklanır. Azot içeriği yüksek olan tavuk gübresi belli oranlarda azot kapsamı düşük biyo yakıtlarla karıştırılarak NO_x emisyonlarının daha da iyileştirilmesi sağlanabilir. Bitkisel kaynaklı biyoyakıt kaynaklarının sülfür değerleri birbirine yakın bulunmuş ve tavuk gübresinden çok düşük tespit edilmemiştir. Bu nedenle biyoyakıt kaynaklarının tavuk gübresinin kükürt kaynaklı emisyonlarını düzeltmesi sınırlı kalacaktır. Diğer yandan, kümes atıklarının yakılması ile ortaya çıkan CO₂, SO₂ ve NO_x emisyonları, fosil kaynaklı birincil enerji kaynaklarından her zaman daha düşük bulunmaktadır [15, 17]. Kümes atıklarının saf halde yakılması veya diğer biyokütle ürünleri ile yakılması, en yüksek çıkması beklenen NO_x emisyonlarında dahi Avrupa Birliği standartlarını sağlayabilmektedir.

Tavuk gübresi diğer hayvansal gübrelerle karşılaştırıldığında kül oranı en yüksek gübredir, çünkü tavuk yemi dönüştürme oranı yüksek besin

maddelerinden yapılır ve bu nedenle sindirim sisteminde organik madde giderimi yüksektir. Çalışmada analiz edilen biyoyakıt kaynakları arasında en yüksek kül miktarı tavuk gübresinde tespit edilmiştir. Tablo 3’de külün mineral analiz sonuçları verilmiştir.

Table 3. Çalışmada incelenen biyokütle maddelerin kül bileşimleri, değerler % olarak verilmiştir. (The ash composition of biomass sources investigated in the study are given in %)

Parametre	Tavuk Güb.	Ağaç talaşı	Fındık kab.	Mısır sapı	Çeltik kav.
SiO ₂	8.1	35.9	40.5	38.7	56.4
CaO	17.3	24.7	18.9	12.2	10.6
P ₂ O ₅	24.4	1.9	2.8	2.6	2.3
K ₂ O	16.3	6.6	9.7	26.3	15.7
Al ₂ O ₃	1.9	11.9	9.3	7.1	1.3
MgO	5.0	3.5	4.9	4.5	4.7
Fe ₂ O ₃	1.2	7.9	6.6	1.1	1.4
Na ₂ O	9.2	1.7	2.0	2.4	2.0
SO ₃	6.7	0.9	1.0	1.5	1.1
Mn ₂ O ₂	0.2	1.3	0.9	0.6	1.9

Biyoyakıt küllerinin genel olarak odun külü karakteri göstermesi istenir [19]. Odun külünde toprak metalleri Si, Ca ve Al oksitler hakimdir. Bileşimi ve karakteri ligno-selülozik yakıtlardan tamamen farklı tavuk gübresinde ise tavuk yeminde hakim olan maddelerin külü daha fazla bulunmuştur. Azot, tavuk külünün temel elementi olmakla birlikte yanma esnasında tamamen hava emisyonlarına gitmiştir. Kül emisyonları genel olarak azot içermez. Tavuk gübresinde alkali metal konsantrasyonları (Na₂O ve K₂O) diğer biyoyakıt kaynaklarına kıyasla çok yüksek bulunmuştur (Tablo 3). Biyoyakıtın kül konsantrasyonu ve kül bileşimi yanma kalitesi ve ısıtma değerini etkiler. Bu nedenle, kül içinde fazla miktarda P, K, S, Cl gibi elementler istenmez, çünkü yanma kalitesi, enerji dönüşüm etkinliği üzerine olumsuz etkide bulunurlar [18]. Alkali kül konsantrasyonunu yüksekliği, özellikle klor ve kükürt ile ilgili bileşikler, partikül emisyonu, cüruf, is-katran oluşumu ve korozyona neden olma potansiyeline sahiptir. Bu bileşenlerin tavuk gübresinde yüksek olması, tek başına yakılmaktansa, çalışmada incelenen diğer tarımsal ürün artıklarıyla daha düşük olmasından dolayı ürünlerin uygun karışımlar hazırlanarak birlikte yakılmasının yanma kalitesi ve enerji verimliliği yönünden daha doğru olacağını göstermektedir.



4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yapılan çalışmada, yüksek rutubet içeriğinde, düşük kalorifik değere sahip olan kümes atıklarının, yakılabilir kuruluğa getirildiğinde kalorifik değerinin yükseldiği, enerji değeri yüksek biyoyakıt kaynakları ile bir araya getirildiğinde, yanma özellikleri ve emisyon değerlerinde iyileşme sağlandığı tespit edilmiştir. Tavuk gübresinde tespit edilen alt ısıl değerler ürünler, hasat artığı ürünleriyle kıyaslandığında çok düşük değildir ve bu ürünlerle karıştırılarak yükseltme potansiyeli bulunmaktadır. Yakıt özellikleri iyileştirildiğinde, kümes atıkları üretildikleri kümeşte yakıt olarak kullanılmak üzere katma değer eklenmiş yenilenebilir enerji kaynağı haline getirilebilir. Diğer yandan, kümes atıklarının yakılmasıyla ortaya çıkan yanma gazı emisyonları yönetmelik sınır değerlerini sağlamaktadır. Kül emisyonlarında ise toprak metalleri ve fosfor oranı yüksektir ve çevresel açıdan risk taşımamaktadır. Külün içerdiği yüksek oranlı fosfor geri kazanıldığında gübre ham maddesi olarak da değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. Karaca ve A. Başçetinçelik, “Defne yapağının briketleme ve yanma özellikleri”, *Enerji Tarımı ve Biyoyakıtlar 4. Ulusal Çalıştayı*, pp. 131-138, 2009.
- [2] R. Samuelsson, M. Thyrel, M. Sjöström, ve A.T. Lestander, “Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuels pellet quality”, *Fuel Processing Technology*, vol. 90, pp. 1129 - 1134, 2009.
- [3] Y E. Kapluhan, “A research in the field of energy geography: Usage of biomass Energy in the World and Turkey”, *Maramara Coğrafya Dergisi*, vol. 30, pp. 97-125, 2014.
- [4] K.L. Abt, R.C. Abt, C.S. Galik ve K.E. Skog. “Effect of Policies on Pellet Production and Forests in the U.S. South: A Technical Document Supporting the Forest Service Update of the 2010 RPA Assessment”, *General Technical Report SRS-202*. US Forest Service, Southern Research Station, Asheville, NC. 2014.
- [5] K. Ericsson ve J.L. Nilsson, “International biofuel trade - A study of Swedish import”. *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, pp. 205-220, 2004.

- [6] K. Kaygusuz ve M.F. Türker, “Biomass energy potential in Turkey”, *Renewable Energy*, vol. 26, pp. 661–678, 2001.
- [7] K. Ishii, T. Furuichi, A. Fujiyama ve S. Watanabe, “Logistics cost analysis of rice straw pellets for feasible production capacity and spatial scale in heat utilization systems: A case study in Nanporo town, Hakkaido Japan”, *Biomass and Bioenergy*, vol. 95, pp. 155-166, 2016.
- [8] S. Ozdemir, B. Sezer, “Utilization of poultry litter as organic fertilizer or bio-fuel”, *Journal of Poultry Research*, vol. 10, pp. 20-24, 2013.
- [9] S. Li, A. Wu, S. Deng, ve W.P. Pan, “Effect of co-combustion of chicken litter and coal on emissions in a laboratory-scale fluidized bed combustor”, *Fuel Processing Technology*, vol. 89, pp. 7-12, 2008.
- [10] P. Abelha, I. Gulyurtlu, D. Boavida, J.S. Barros, I. Cabrita, J. Leahy ve M. Leahy, “Combustion of poultry litter in a fluidised bed combustor”. *Fuel*, vol. 82, pp. 687-692, 2003.
- [11] R. Alamsyah, E.H. Loebis, E. Susanto, L. Junaidi ve N.C. Siregar, “An experimental study on synthetic gas (syngas) production through gasification of Indonesian biomass pellet”, *Energy Procedia*, vol. 65, pp. 292-299, 2015.
- [12] A. Kraszkiwicz, M. Kachel-Jakubowska, E. Lorencowicz, ve A. Przywara, “Influence of cellulose content in plant biomass on selected qualitative traits of pellets”, *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, vol. 7, pp. 125-130, 2015.
- [13] G. Quiroga, Y. Castrillon ve E. Maranon, “Physico-chemical analysis and calorific values of poultry manure”, *Waste Management*, vol. 30, pp. 880-884, 2010.
- [14] N.S. Bolan, A.A. Szogi, T. Chuasavathi, B. Seshadri, M.J. Rothrock ve P. Panneerselvam, “Uses and management of poultry litter”, *World’s Poultry Science Journal*, vol. 66, pp. 673-689, 2010.
- [15] SKHKK. “Sanayi kaynaklı hava kirliliğinin kontrolü yönetmeliği”, *Resmi Gazete*, Sayı. 27277, 2009.
- [16] A. Garcia-Maraver, J.A. Perez-Jimenez, F. Serrano-Bernardo ve M. Zamorano, “Determination and comparison of combustion kinetics parameters of agricultural biomass from olive trees”, *Renewable Energy*, vol. 83, pp. 897-904, 2015.
- [17] J. Villeneuve, J.H. Palacios, P. Savoie S. Godbout, “A critical review of emission standards and regulations regarding biomass combustion in small scale units (< 3MW)”, *Bioresource Technology*, vol. 111, pp. 1-11, 2012.
- [18] R. Smith, ve F.M. Slater, “The effects of organic and inorganic fertilizer applications to Miscanthus × giganteus, Arundo donax and Phalaris arundinacea, when grown as energy crops in Wales”, *UK. Gcb Bioenergy*, vol. 2, pp. 169-179, 2006.
- [19] O.H. Dede, ve D. Akbulut, “Analyzing the effects of biomass and coal ash for the dewatering properties of sewage sludge”, *Sakarya University Journal of Science*, vol. 21, pp. 907-914, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		 SAKARYA UNIVERSITY
	e-ISSN: 2147-835X		
	Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 21-08-2017		
	<u>Kabul/Accepted</u> 09-02-2018		<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.335545

Farklı oranlarda CrC partikül takviyesi kullanılarak toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş Cu matrisli kompozit malzemelerin mikroyapı ve sertlik özelliklerinin incelenmesi

Mahir Uzun^{*1}, Mehmet Mehdi Munis², Üsame Ali Usca³

ÖZ

Bu çalışmada, toz metalürjisi (T/M) yöntemi kullanılarak farklı oranlarda CrC partikülleri, Cu matrisi içerisinde kullanılarak Cu matrisli kompozit malzeme üretimi, CrC partiküllerinin Cu matrisli kompozit malzemenin sertlik değerine etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla Saf Cu tozu içerisine CrC partikülleri ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 olmak üzere farklı oranlarda katılmıştır. Hazırlanan numuneler, turbula karıştırıcı kullanılarak 24 saat karıştırılmıştır. Hazırlanan karışımlar 450 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Şekillendirilen parçalar 950 °C'de 60 dakika boyunca sinterlenmiştir. Sinterlenen numunelerin gerçek ve teorik yoğunlukları tespit edilmiştir. Sinterleme işleminin başarısı yoğunluğun ve SEM görüntülerinin incelenmesi ile değerlendirilmiştir. Üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı ve sertlik değerleri incelenmiştir. Mikroskop incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak yapılmıştır. Yapılan SEM incelenmesinde, eş eksenli tanelerden oluşan Cu matrisi içerisinde CrC fazının dengeli dağıldığı gözlenmiştir. Yapılan sertlik ölçümlerinde, CrC oranı arttıkça buna bağlı olarak sertliğin arttığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: bakır, kompozit, krom-karbür, sertlik

Investigation of microstructure and hardness properties of Cu matrix composite materials produced by powder metallurgy using CrC particle reinforcements at different ratios

ABSTRACT

In this study, it was aimed to investigate the effect of CrC particles in Cu matrix, Cu matrix composite material production, CrC particles hardness value of Cu matrix composites using powder metallurgy (P / M) method.. For this purpose, CrC particles in pure Cu dust were added at different ratios of 5%, 10%, 15% and 20% by weight. The prepared samples were stirred for 24 hours using a turbula mixer. The prepared mixtures were shaped under a pressure of 450 MPa. The shaped parts were sintered at 950 °C for 60 minutes. The actual and theoretical densities of the sintered samples were determined The success rate of sintering was evaluated by examining the intensity and SEM images. Microstructure and mechanical properties of the produced composite materials were investigated. Microstructure and hardness values of the produced composite materials were investigated. Microscope studies were performed using scanning electron microscopy (SEM). In the SEM study, it was observed that the CrC phase was uniformly distributed in the Cu matrix composed of coaxial grains. In the hardness measurements made, it was observed that as the CrC ratio increased, the hardness increased accordingly.

Keywords: copper, composite, crom-carbide, hardness

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Mahir Uzun Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

² Mehmet Mehdi Munis Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

³ Üsame Ali Usca Makine Mühendisliği Bölümü, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte birçok yeni malzeme çeşidi geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Geliştirilen bu malzemeler, günümüz şartlarına daha uygun olmakta ve kullanımları da yaygınlaşmaktadır. Metal matrisli kompozit malzemeler de son yıllarda çok çalışılmakta ve yeni malzeme türleri üretilmektedir.

T/M ile üretim yöntemi, tam veya yarı mamul ürünleri üretmek için kullanılan bir yöntemdir [1]. Metallerin ergime sıcaklıklarının çok yüksek olmasından dolayı ve bu sıcaklıklara ulaşılmasının endüstriyel şartlar altında çok zor olması sebebi ile bazı kompozit malzemelerin, süper alaşım ve sert metaller gibi bazı malzemelerin üretiminin ancak T/M yöntemi ile mümkün olabileceği ifade edilmiştir [2,3,4].

Birçok farklı Cu alaşımları kimya endüstrisi ve elektro teknolojilerde kullanılırlar [5-7]. Cu alaşımları, iyi ısıl direncine ve elektriksel direncine ek olarak, yüksek korozyon ve oksidasyon direncine de sahiptirler. Bunun yanında bakır, iyi bir sünekliğe ve tokluğa sahiptir [8]. Cu matrisli kompozitlerin termal iletkenliği ve elektriksel iletkenliği yüksektir. Ayrıca bu kompozitlerin mekanik özellikleri ve tribolojik özellikleri de iyidir [9-12].

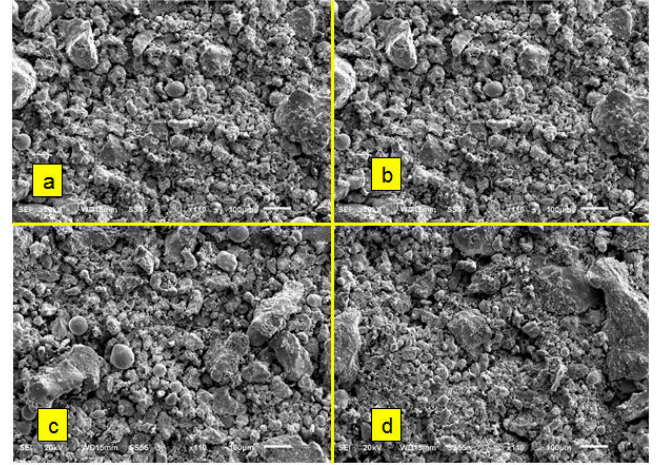
Metal matrisli kompozitler yüksek elastik modülü, yüksek mukavemet ve tekrar üretilebilme gibi birçok pozitif özelliklere sahiptirler [13]. Ayrıca bu malzemeler partikül takviyelerinden dolayı çok iyi aşınma direncine de sahiptirler [14,15]. Bakır matrisli kompozitler üzerine de çok fazla araştırmalar mevcuttur [16]. Yapılan bir araştırmada, bakır matrisine Ni_3Al partikülleri katılarak aşınma dayanımı geliştirilmiştir [9]. Cu-Cr SiC kompozit malzemesi üretilmiş ve yapılan incelemede sertliğin arttığı belirtilmiştir [17]. Ayrıca, Cu matrisine $FeMn_p$ ve $FeCr_p$ katılarak mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir [18]. Cu matrisine farklı ilaveler yapılarak, sertliği, mukavemeti, aşınma direnci ve iletkenliği geliştirilebilir [19]. Ayrıca değişen Cu matris oranları içerisinde çekme dayanımının %4 oranına kadar arttığı; %4 oranında sonra ise azaldığı ve Cu matris oranının artmasıyla sertliğin de arttığı gözlemlenmiştir [20].

Bu çalışmada T/M yöntemi ile Cu matrislerine CrC partikülleri takviye edilerek kompozit malzemeler üretilmiştir. Ağırlıkça %5-20 aralığında farklı oranlarda CrC takviyesiyle üretilen kompozit malzemelerin mikroyapı incelemeleri SEM(Scanning electron microscop) kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca kullanılan elementlerin oranlarının belirlenmesi amacıyla SEM kullanılarak EDS (Enerji dağılımı spektrometresi) analizi yapılmıştır. Sertliğin belirlenmesinde ise Vickers sertlik ölçüm metodu kullanılmıştır.

1. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHODS)

1.1. Deney Numunelerin Hazırlanması (Preparation of Experimental Samples)

Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Cu partikül boyutu $60 \mu m$ 'nin altında kullanılmıştır. Kullanılan CrC tozunun partikül boyutu ise $\leq 100 \mu m$ olacak şekilde seçilmiştir. Seçilen CrC tozunun kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 1'de Cu-CrC tozunun SEM görüntüsü ve Tablo 2'de EDS analiz raporu verilmiştir.



Şekil 1. Ağırlıkça; a) %5 b) %10 c) %15 d) %20 CrC içeren Cu-CrC tozunun SEM görüntüsü (SEM image of Cu-CrC powder containing CrC)

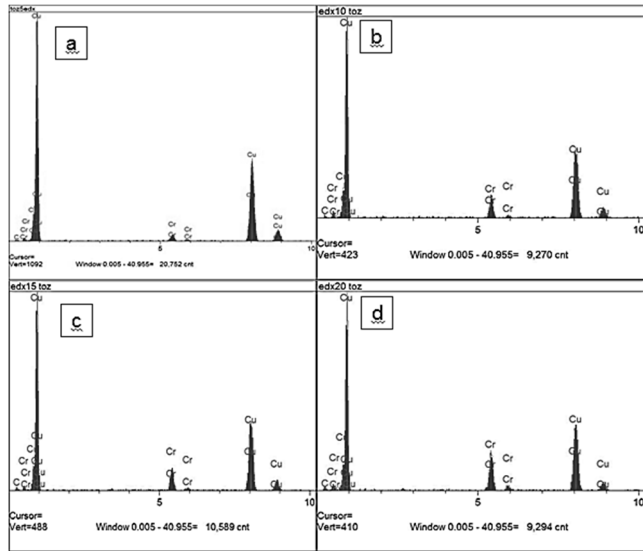
Tablo 1. CrC tozunun kimyasal bileşimi (Chemical composition of CrC powder)

Element	Saflik
Cr	%88-91 min.
C	%8-11 max.
Si	%0.6 max.
S	%0.05 max.
Fe	%0.5 max.
P	0.05 max.

Tablo 2. Ağırlıkça %10 Cu-CrC tozunun EDS analiz raporu (EDS analysis report of 10% Cu-CrC powder by weight)

Element	Yoğunluk (C/S)	Hata 2-SIG	Sonuç	Birim
C	6.86	5.732	3.499	%WT.
Cr	152.08	13.418	8.598	%WT.
Cu	620.21	25.536	87.903	%WT.
TOPLAM			100.000	%WT.

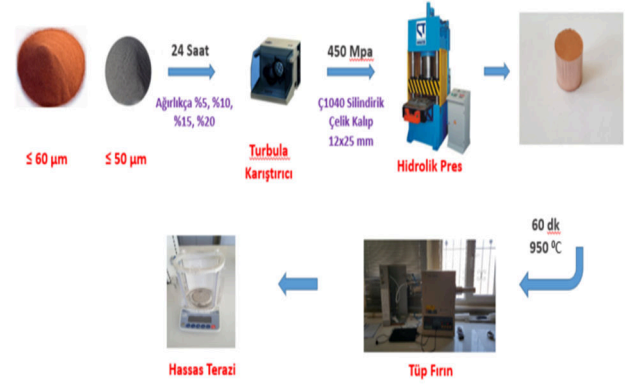
Metal matrisli kompozit malzemeler, toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Metal matris içerisine ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında CrC partikül takviyesi yapılarak homojen bir karışım sağlanmış ve turbula karıştırıcı kullanılarak, toz malzemeler 24 saat karıştırılmıştır. Karışımın homojen dağılımı SEM’de yapılan EDS analizi ile doğrulanmıştır (Şekil 2).



Şekil 2. Ağırlıkça; a) %5 b) %10 c) %15 d) %20 CrC içeren Cu-CrC tozunun EDS analizi grafiği (EDS analysis of Cu-CrC powder containing CrC)

Daha sonra karıştırılan tozlar hidrolik pres kullanılarak 450 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Şekillendirilmede Ç1040 malzemeden üretilen çelik kalıp kullanılmıştır, kullanılan kalıp silindirik şekilli olup 12 mm çapında ve 25 mm derinliğindedir.

Presleme sonrası elde edilen numuneler 950⁰C’de 50 dakika boyunca koruyucu atmosfer altında sinterlenmiştir. Bu işlem Protherm GSL-1500X marka tüp fırında alümina altlık kullanılarak yapılmıştır. Sinterlenen numunelerin ağırlıkları A&D HR-250AZ marka hassas terazi kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Çalışmanın şema halindeki aşamaları (Stages of work scheme)

Kütleleri belirlenen numunelerin çapları ve boyları ölçüldükten sonra hacimleri bulunmuştur.

$$\rho_{true} = \frac{m}{v} \quad (1)$$

ρ_{true} : Numunenin gerçek yoğunluğu (gr/cm³), m: Numune kütlesi (gr), v: Numune hacmi(cm³)

Gerçek yoğunluk formül 1’e göre hesaplanarak bulunmuştur. Numunelerin teorik yoğunluğu ise;

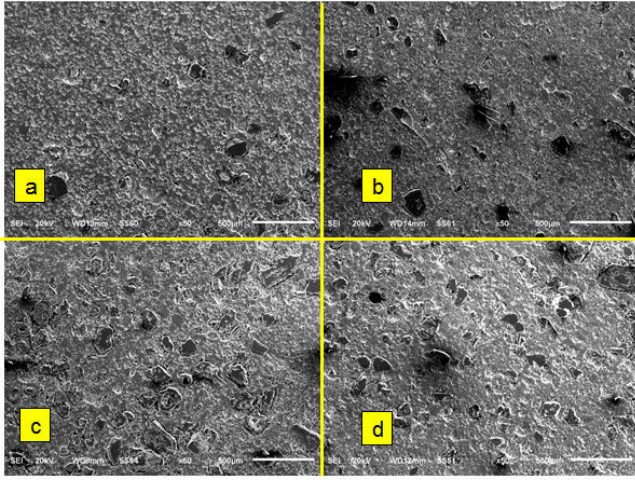
$$Dt = [(\%W_{Cu} * D_{Cu}) + (\%W_{Cr} * D_{Cr}) + (\%W_C * D_C)] \quad (2)$$

Dt: Numunenin teorik yoğunluğu (gr/cm³), D_{Cu} : Bakır numunesinin yoğunluğu (gr/cm³), D_{Cr} : Krom numunesinin yoğunluğu (gr/cm³), D_C : Karbon numunesinin yoğunluğu (gr/cm³), $\%W_{Cu}$: Ağırlıkça Cu yüzde oranı, $\%W_{Cr}$: ağırlıkça Cr yüzde oranı, $\%W_C$: ağırlıkça C yüzde oranı

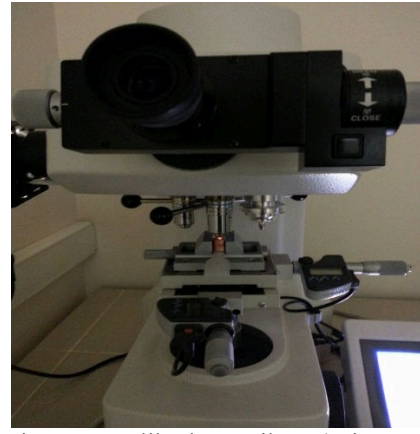
Gerçek yoğunluğun teorik yoğunluğa oranlanmasıyla bağlı yoğunluk elde edilmiştir (Şekil 9).

1.2. Deney Numunelerine Ait Metalografik Çalışmalar (Metallographic Studies of Experimental Samples)

Presleme sonrası sinterlenen numuneler. Parlatıldı ve dağlandı. Mikroyapısal incelemeler yapılmak üzere yüzeyleri parlatılan numunelerin her biri %5 Nital ile dağlandıktan sonra etil alkolle temizlenip sıcak hava fırınında 50⁰ C’deki sıcak hava ile yaklaşık 1 saat kurutulmaya tabi tutulmuştur. Kurutma işleminden çıkan numunelerin mikroyapısal özellikleri JEOL JSM-6510 Scanning Electron Microscope (SEM) cihazında incelenmiştir (Şekil 4). Elementlerin dağılımı için EDS analiz grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 5).



Şekil 4. Ağırlıkça; a) %5 b) %10 c) %15 d) %20 CrC içeren sinterlenmiş Cu-CrC numunesi SEM görüntüsü (SEM image of CrC-containing sintered Cu-CrC sample)



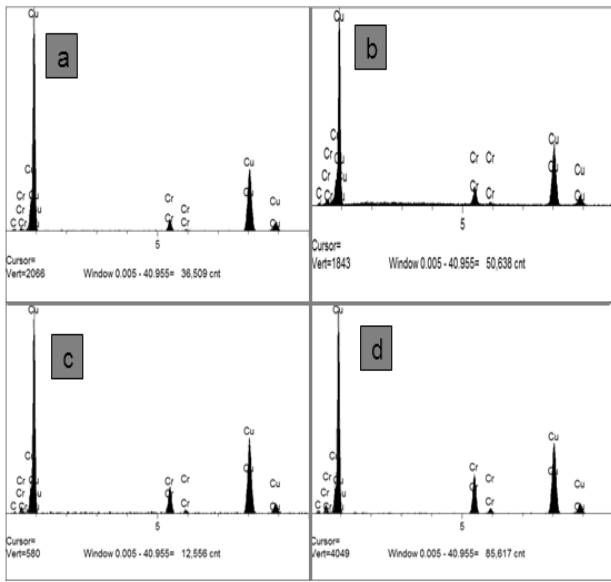
Şekil 6. Mitutoyo sertlik ölçüm cihazı (Mitutoyo hardness tester)

2. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada Cu metal matrisli tozlara farklı oranlarda CrC partikülleri katılarak toz metalürjisi tekniği ile Cu matrisli kompozit malzemeler üretilmiştir. Üretilen malzemelerin mikroyapıları ve malzemelerin sertlik değerleri incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

2.1. Mikroyapı Özellikleri (Microstructure Properties)

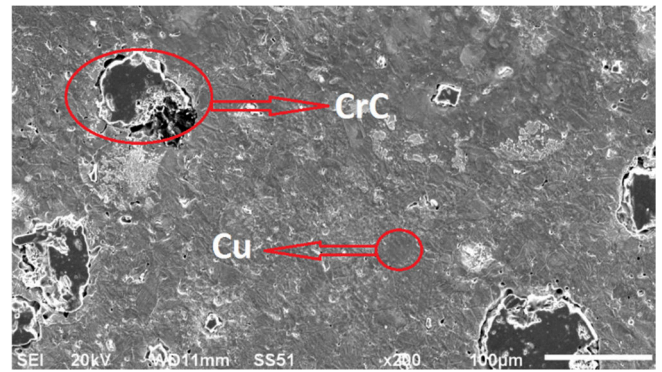
Sinterleme sonucunda, yüzey dağlanmış ve kompozit malzemelerin ağırlıkça %5-%20 arasındaki numunelerin ve saf bakır numunesinin SEM görüntüsü alınmıştır. SEM görüntülerinden sinterleme sonrası taneler arasında sağlıklı ikizlenmelerin olduğu ve gözenek yapının azaldığı, ayrıca tane sınırlarının net bir şekilde görülebildiği tespit edilmiştir.



Şekil 5: Ağırlıkça; a) %5 b) %10 c) %15 d) %20 CrC içeren sinterlenmiş Cu-CrC numunesinin EDS analizi grafiği (EDS analysis of CrC-containing sintered Cu-CrC sample)

1.3. Sertlik Ölçüm Testi (Hardness Measurement Test)

Numunelerin sertlik ölçümleri ise ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 oranında CrC partikül içeren üç farklı numune üzerinden beş farklı noktadan ölçüm alınarak Mitutoyo Sertlik Ölçüm cihazında 10 sn boyunca 200 gr yük altında Vickers sertlik metodu yöntemi ile ölçülmüştür (Şekil 6).



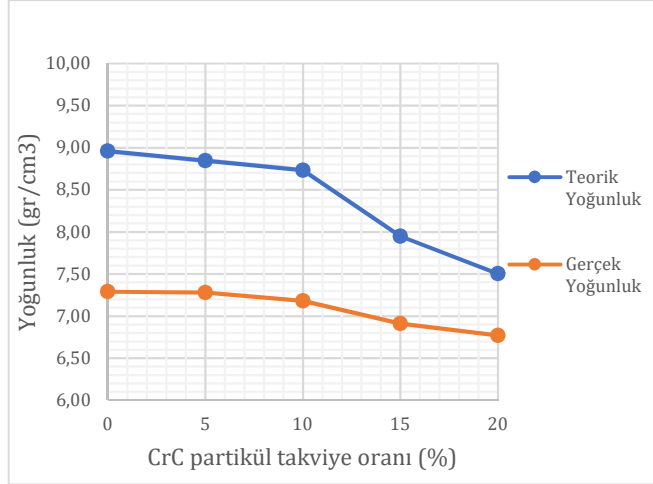
Şekil 7. Ağırlıkça %5 CrC partikül takviye oranına sahip Cu-CrC kompoziti (Cu-CrC composite with 5% CrC particle reinforcement ratio by weight)

Ayrıca takviye edilen CrC partiküllerinin homojen dağıldığı ve herhangi bir bölgede kümelenmediği anlaşılmıştır. SEM görüntülerinden tane

boyutlarının 50 µm altında olduğu, dolayısıyla tane irileşmesinin olmadığı tespit edilmiştir.

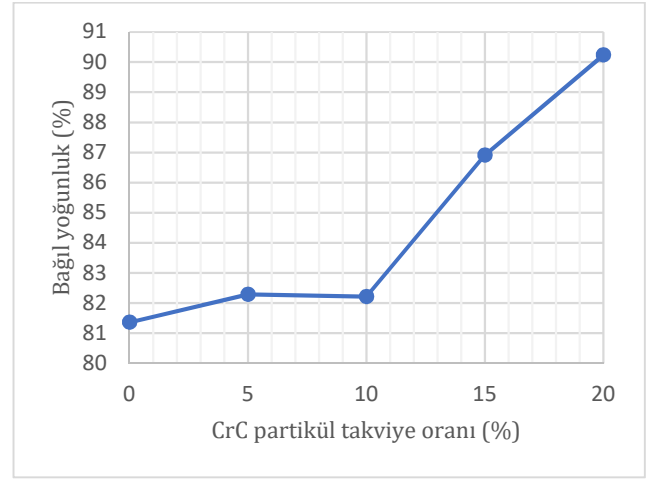
2.2. Yoğunluk Özellikleri (Density Properties)

Denklem 1 ve 2'ye göre numunelerin yoğunluk hesaplamaları yapılmış, elde edilen veriler neticesinde Şekil 8'deki grafik oluşturulmuştur.



Şekil 8. CrC partikül takviye oranına bağlı olarak değişen yoğunluk grafiği (Density graph depending on CrC particle reinforcement ratio)

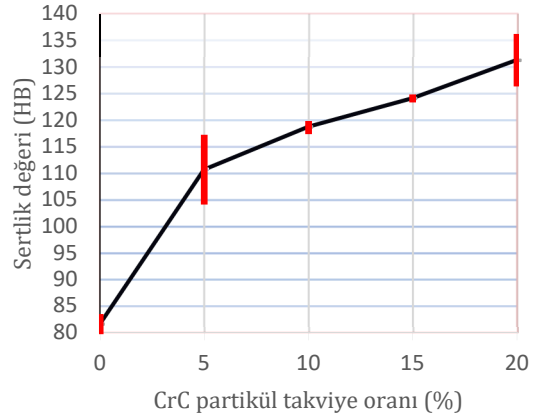
Üretilen Cu-SiC kompozit malzemesinde bazı Cu-SiC ara yüzeylerinde gözenekler olduğu bu nedenle bağıl yoğunluğun artan SiC oranı ile düşüş sergilemesinde Cu matrisin SiC partiküllerini ıslatma kabiliyetinin de etkili olduğu belirtilmiştir [21]. Bu çalışmada ise yüzde olarak bakır içerisindeki CrC oranı arttıkça gözenek miktarı azalmış bununla beraber bağıl yoğunluğunda buna paralel olarak arttığı gözlemlenmiştir. (Şekil 9). CrC takviye oranı teorik yoğunluğu düşürürken, gerçek yoğunlukta ise gözenekli yapının az olmasından dolayı düşüş miktarı teorik yoğunluktan daha az olmaktadır. Bu durumda bağıl yoğunluk değerine artış olarak yansımaktadır.



Şekil 9. CrC partikül takviye oranına bağlı olarak değişen bağıl yoğunluk grafiği (Relative density graph depending on CrC particle reinforcement ratio)

2.3. Sertlik Özellikleri (Hardness Properties)

Beş farklı noktadan yapılan ölçümlerin ortalamalarının alınmasıyla oluşturulan Şekil 10'da verilen sertlik ölçüm değerlerinde artışın görülmesi bu çalışmayı desteklemektedir.



Şekil 10: CrC partikül takviye oranına bağlı olarak değişen sertlik grafiği (Hardness graph depending on CrC particle reinforcement ratio)

Yapılan incelemede en yüksek sertlik değeri 135,6 HB değeri ile ağırlıkça %20 CrC partikül takviyeli numunelerde görülmüştür. Sertlik değerlerindeki bu artış oranı, CrC takviye oranına paralel olarak artış göstermektedir. Sertlikteki bu değer artışı, CrC takviye oranının artışı ile birlikte diğer mekanik özelliklere de olumlu yansımaları göstermektedir. Yapılan mikro sertlik ölçümlerinde ağırlıkça % Cr-SiC partikül oranı artışına paralel olarak sertlik değerlerinde artış olduğu belirtilmektedir [17].

3. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada T/M yöntemi kullanılarak, saf bakır numunesine %5,10,15,20 oranlarında CrC partikül takviyesi yapılmıştır. Bu yöntemle üretilmiş olan ve her orandan üçer adet olmak üzere toplam 15 adet numune üzerinde, gerçek yoğunluk ölçümleri yapılmış ve hesaplanan teorik yoğunlukla kıyaslanmış ve ayrıca mekanik özelliklerinden olan sertliğin tespiti amacıyla sertlik ölçümleri yapılmıştır.

1. CrC takviyesiyle üretilmiş olan bakır matrisli kompozit malzeme de takviye oranı arttıkça teorik yoğunluk değeri ile gerçek yoğunluk değerinin aynı oranda düşmediği görülmüştür. Gerçek yoğunluğun düşme oranının teorik yoğunluktaki düşüşten daha az olduğu görülmüştür.
2. Yapılan sertlik ölçümlerinde, Cu içerisindeki CrC partikülleri arttıkça sertlik değerinin de yükseldiği görülmüştür.
3. T/M kullanılarak üretilmiş olan Cu-CrC malzemesinde CrC oranı arttıkça sertlik değerlerinin artması, CrC takviyesinin çekme dayanımı gibi diğer özelliklere de pozitif katkı sağlayacağı, beklentisiyle bu çalışmalar yapılabilir.
4. Ayrıca bu çalışmada saf bakır tozuna yapılan CrC takviyesinin, saf bakırda meydana getirdiği kimyasal değişim ve elektrik iletkenliğinin değişimi de incelenebilir.
5. Yine farklı CrC takviyeleri sonucunda malzemede aşınma dayanımının tespit edilmesi ile birlikte, üretilen bu kompozit malzemenin endüstride kullanımını desteklenebilir.



TEŞEKKÜR(ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Bingöl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından (Proje no: MMF.3.16.001) desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. S. Yılmaz, “Demir esaslı T/M parçaların yüzey sertleştirme işlemlerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi”, *Doktora Tezi*, Celal Bayar Üniversitesi, Manisa, Türkiye, 2004.
- [2] A. Lawley, *Atomization: The Production Of Metal Powders*, United States, Metal Powder Industries, 1992.
- [3] H. Turan and S. Sarıtaş, “Metal dust production with gas atomization”, *6. International Machine Design and Manufacturing Congress*, Ankara, Türkiye, 1994.
- [4] S. S. Yılmaz, B. S. Ünlü and R.Varol, “ Borlanmış ve bilyalı dövülmüş demir esaslı T/M malzemelerinin aşınma ve mekanik özellikleri”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, pp. 7-16, 2008.
- [5] H. J. Bargel, *Werstoffkunde*, VDI-Verlag, 1980.
- [6] K. N. Tandon and R. Z. Tian, “Effect of Pb on the wear behavior of a Cu-Pb alloy”, *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 29, pp. 857-861, 1993.
- [7] M. Barmouz, P. Asadi, M. K. B. Givi and M. Taherishargh, “Investigation of mechanical properties of Cu/SiC composite fabricated by FSP: Effect of SiC particles’ size and volume fraction”, *Material Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 1740-1749, 2011.
- [8] M. Barmouz, M.K.B. Givi and J. Seyfi, “On the role of processing parameters in producing Cu/SiC metal matrix composites via friction stir processing: Investigating microstructure, microhardness, wear and tensile behavior”, *Materials Characterization*, vol. 62, pp. 108-117, 2011.
- [9] Z. Chen, P. Liu, J. D. Verhoeven and E. D. Gibson, “Sliding wear behavior of deformation-processed Cu-15vol.%Cr in situ composites”, *Wear*, vol. 195, pp. 214-222, 1996.
- [10] P.D. Funkenbusch, T. H. Courtney and D.G. Kubisch, “Fabricability of an microstructural development in cold-worked metal matrix composites”, *Scripta Metallurgica et Materialia*, vol. 18, pp. 1099-1104, 1984.

- [11] D. Nath, S. K. Biswas and Rohatgi PK. "Wear characteristics and bearing performance of aluminum-mica particulate composite-material", *Wear*, vol. 60, pp. 61-73, 1980.
- [12] N. Saka and D. P. Karalekas, "Friction and wear of particle-reinforced metal ceramic composites", *Proceedings of the International Conference on Wear of Materials*, Canada, 1985.
- [13] M. Muratoğlu and M. Demirel, "Influence of non-standart geometry of plastic gear on sliding velocities", *5. International Advanced Technologies Symposium*, Karabük, Turkey, 2009.
- [14] A. T. Alpas and J. Zhang, "Effect of SiC particulate reinforcement on the Dry Sliding Wear of Aluminum Silicon Alloys (A356)". *Wear*, vol. 155, pp. 83-104, 1992.
- [15] R. Chen, A. Iwabuchi, T. Shimizu, H. S. Shin and H. Mifune, "The sliding wear resistance behavior of NiAl and SiC particles reinforced aluminum alloy matrix composites", *Wear*, vol. 213, pp. 175-184, 1997.
- [16] Y. H. Liang, Q. Zhao, Z. H. Zhang, X. J. Li, and L. Q. Ren, "Effect of B4C particle size on the reaction behavior of self-propagation high-temperature synthesis of TiC-TiB2 ceramic/Cu composites from a Cu-Ti-B4C system", *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 46, pp. 71-79, 2014.
- [17] A. Yonetken, A. Erol and H. Kaplan, "Microwave sintering and characterization of Cu-Cr-SiC composite materials", *24th International Conference on Metallurgy and Materials Metal 2015*, Brno, Czech Republic, 2015.
- [18] H. Turhan, T. Yildiz and B. Gulenc, "Microstructure and mechanical properties of Cu/Fe Mnp and Cu /FeCrp matrix composites produced by powder metallurgy". *Firat University Science and Engineering Magazine*, vol.19, pp. 569-574, 2007.
- [19] W.D. Callister, *Materials Science And Engineering: An Introduction*, John Wiley & Sons, 2007.
- [20] A. Bektaşoğlu and T. Savaşkan, "Zn-60Al-(1-5) Cu alaşımlarının kuru sürtünme durumundaki aşınma özelliklerinin incelenmesi", *Mühendis ve Makine*, vol. 46, pp. 31-39, 2005.
- [21] O. Ozgün, Z. Balalan and O. Ekinçi "Microstructure and mechanical properties of Cu matrix composites with SiC particle reinforcements at different ratios", *International Material Science and Technology Conference*, Nevşehir, Turkey, pp. 229-233, 2016.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 05.05.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 06.12.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.310649	

Kiriş gövdesinde berkitmeli alın levhalı birleşimlerin davranışının deneysel analiz

Merve Sağıroğlu*¹

ÖZ

Çelik yapıların, çeşitli yükler altında davranışı kiriş-kolon birleşim noktalarının davranışına bağlıdır. Dolayısıyla en iyi moment-dönme eğrileri ile temsil edilen kolon-kiriş birleşimleri davranışı, çerçeve sistemlerin davranışında önemli rol oynamaktadır ve birleşim elemanlarının geometrik parametrelerinin değişimi moment-dönme eğrisini ve analiz sonuçlarını etkilemektedir. Bu çalışma kapsamında mevcut alın levhalı birleşimden farklı olarak berkitme levhasının kiriş gövdesine ve alın levhasına kaynatılması önerilen birleşim tipinin moment-dönme karakteristiği deneysel olarak incelenmiştir. Farklı alın levha kalınlıkları için bu birleşimin göçme şekilleri, moment-dönme eğrisi ve karakteristikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Ayrıca deney sonuçları, bu birleşime yakın davranış gösteren ve aynı levha kalınlıklarına sahip T-elemanlı birleşim deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Alın levhası kalın olan birleşim ince olana göre daha rijit olurken, alın levhalı birleşimlerin T-elemanlı birleşimlere göre daha sünek olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: berkitme levhası, alın levhalı birleşim, moment-dönme eğrisi

Experimental analysis on behaviour of end-plate connections with web-stiffener

ABSTRACT

The behavior of steel structure depends on the behavior of beam-to-column connections under various loading. Thus, the behavior of beam-to-column connections which are presented well with moment-rotation curve plays an important role in frame systems, and variation of geometric parameters of connection elements effects analysis results and moment-rotation curves. This study suggests on experimentally understanding the structural behavior of end plate connection whose stiffener is welded in web of the beam and end-plate. It is evaluated comparatively the failure modes, moment-rotation curve and characteristics of the connections which have different end-plate thickness. Also, experimental results of the end-plate connections are compared to results of T-element connections whose flange thickness is equal to end-plate thickness. While the connection has thicker end plate is more rigid according to the connection has thinner end plate, the end-plate connection is more ductile according to T-stub connection.

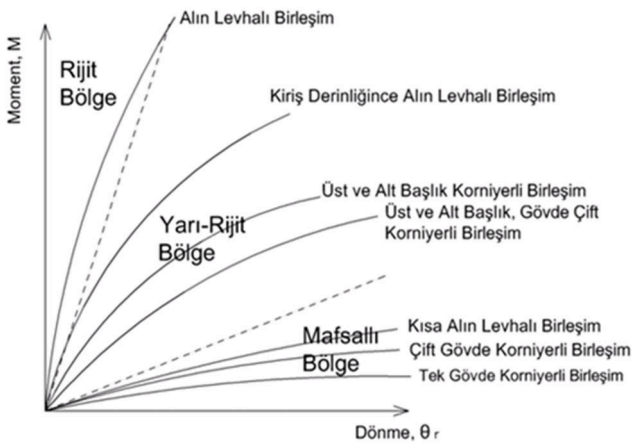
Keywords: stiffener, end-plate connection, moment-rotation curve

* Corresponding Author: Merve Sağıroğlu

¹ Affiliation, e-mail: merve.sagiroglu@erzurum.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çelik bir yapının gerçek davranışını anlayabilmek için birleşimlerin davranışı hakkında bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Çelik yapıların davranışının gerçekçi olarak incelenebilmesi için malzeme, geometri gibi temel özelliklerinin yanında kiriş-kolon birleşim davranışının da göz önüne alınması gerekmektedir. Birleşimler kuvvetleri bir elemandan diğerine aktaran araçlardır ve yapı sistemlerindeki birleşimlerin aktardığı en önemli kuvvet momenttir. Dönme deformasyonları, birleşimde momentin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Kiriş-kolon birleşimlerinin taşıma gücü için yapılan deneylerin sonuçları da moment-dönme eğrileri ile yapı elemanlarının birleşim davranışlarının daha iyi ifade edilebildiğini gösterilmiştir. Moment-dönme eğrisi, moment ve ona bağlı olan dönme miktarının karşılıklı etkileşimini gösterir. Yaygın kullanılan birleşim çeşitlerinin moment-dönme (M- θ) davranışı Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. 7 tip birleşim için moment-dönme eğrileri
(Moment-rotation curves for 7 connection types)

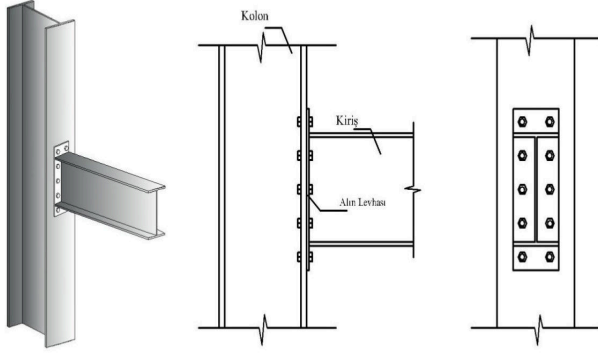
Tasarlanan birleşimler, içerdikleri bileşenlere ve bunların yerleştiriliş şekline göre değişik moment-dönme eğrilikleri oluşturmaktadırlar. Bu moment-dönme eğrilikleri, seçilen birleşim tipinin levha ve korniyer kalınlığı, bulon çapı, birleşim derinliği gibi geometrik parametrelere bağlı olarak oluşmaktadır. Birleşime giren elemanların geometrik parametrelerinin değişimi, moment-dönme eğrisini ve analiz sonuçlarını oldukça etkileyebilmektedir [1]. Ngo-Huu ve diğ. [2] üç boyutlu çelik çerçevelerin lineer olmayan analizi için nümerik bir çalışma yapmış, birleşimin rijitliğinin çelik çerçevenin dayanım ve deplasmanını etkilediğini göstermiştir. Yük altında bulon, kaynak, levha, korniyerler gibi deforme olabilen birleşim elemanlarının

malzemeleri elastik aralıkta olsa dahi Şekil 1’de görüldüğü gibi kiriş-kolon birleşimleri doğrusal olmayan davranış gösterirler [3].

Birleşimlerin gerçek moment-dönme karakteristiklerini elde etmenin bir yolu; gerçek boyutlarda yapılan deneylerdir. 1930’lardan beri, birleşimlerin moment-dönme eğrilerinin modellenmesinin metotları, deneysel çalışmalar ile birlikte geliştirilmiştir. Davison ve diğ. [4] deneysel çalışmalardan elde edilen moment-dönme eğrilerini toplamış, hem veri bankası oluşturmuş hem de davranışa şekil verebilmek için verileri sayısallaştırmıştır. Bazı araştırmacılar [5], deneysel sonuçlardan yola çıkarak yarı-rijit birleşimlerin modellenmesi için M- θ eğrileri oluşturan çeşitli matematiksel modeller de önermişlerdir. Bazı araştırmacılar, alt ve üst korniyerli birleşim tipi için hem korniyerlerde hem de kiriş gövdesinde berkitme kullanımını önerdikleri bir birleşim tipini deneysel olarak çalışmışlardır [6-7]. Maali ve diğ [6] kiriş gövdesi berkitmesini farklı kalınlıklarda incelemiş, kalınlık arttıkça moment dayanımı artmasına rağmen süneklik, maksimum yükteki dönme ve enerji yutma kapasiteleri azalmıştır. Bu sebeple, kiriş gövdesi berkitmesinin kullanımı önerilmemiştir. Aydın ve diğ. [7] alt-üst başlık korniyer berkitmelerini farklı kalınlıklarda incelemiş, bu berkitmelerin kalınlıklarının artı ile moment kapasitesinin ve dönme miktarının arttığını göstermişlerdir.

Şekil 2’de gösterilen alın levhalı birleşim tipi literatürde en çok çalışılan ve uygulamada da üretim ve kurulum kolaylığı açısından çokça rastlanılan bir birleşim tipidir. Abidellah ve diğ. [8] aksenal yük altında hem kiriş altından berkitmeli hem de kiriş alt ve üstünden berkitmeli 8 adet uzun alın levhalı birleşimler için deney yapmışlardır. Bu çalışmada, berkitmenin davranışı ve etkisi analitik metotlarla karşılaştırılmış; berkitme kullanımının moment dayanımını artırırken birleşim sünekliğinde düşüşe sebep olduğunu, fakat bu düşüşe rağmen birleşim sünekliğinin yapının plastik davranışına izin verecek düzeyde olduğunu göstermişlerdir. Coelho ve diğ. [9] yüksek mukavemetli çelikten yapılmış alın levhalı birleşimlerin düktilite analizini ve nonlineer davranışın karakteristikliğini deneysel olarak incelemişlerdir. Ayrıca, deneysel çalışmalara ek olarak araştırmacılar kiriş üst ve alt tarafında berkitme yapılan alın levhalı birleşimlerin davranışını teorik olarak [10] ve

sonlu elemanlar metodu [11-12] ile de çalışmışlardır.



Şekil 2. Alın levhalı birleşim (Extended end-plate connection)

Bu çalışmada farklı alın levhası kalınlığına sahip 2 alın levhalı birleşim deneysel olarak incelenmiştir. Bu birleşim literatürden farklı olarak berkitme levhaları kiriş başlıklarına değil kiriş gövdesine ve alın levhasına kaynaklanmıştır. Kiriş gövdesindeki berkitme levhalarının alın levhalı birleşimin davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Birleşim davranışı moment-dönme eğrileri ile ifade edilmiş ve göçme modları değerlendirilmiştir. Sonuçlar bağlantı noktaları (ikisi de sadece gövdeden bağlı) ve levha kalınlığı (levha kalınlıkları aynı seçilerek) benzerliğinden dolayı moment-dönme eğrisinde yakın bölgeye denk geleceği öngörülen T-elemanlı birleşimin deney sonuçları [13] ile karşılaştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL TEST)

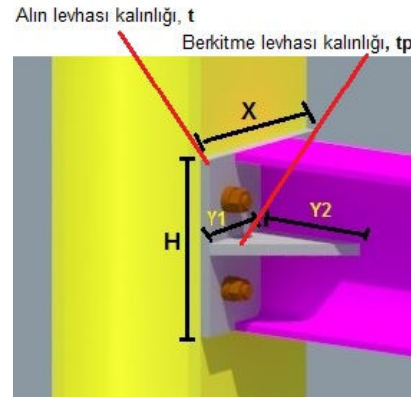
2.1. Birleşim Detayları (Connection Details)

Bu çalışmada, Eurocode 3 [14] şartnamesinde de yer alan ve uygulama rahatlığı dolayısıyla uygulamada sıkça rastlanılan alın-levha birleşim tipi kullanılmıştır ve literatürden farklı olarak alın levhalı birleşimde kullanılan üçgen hazırlanmış berkitme levhası kiriş başlığına değil kiriş gövdesine kaynaklanmıştır. Bu levha aynı zamanda alın levhasına da kaynaklanmıştır. Deneyde diğer tüm geometrik özellikler sabit tutulurken alın levhasının kalınlığı değiştirilmiştir. Böylece, 7,4 mm ve 8,5 mm kalınlığa sahip 2 alın levhalı birleşimin (Şekil 3a) gövdesindeki berkitme levhasının etkisi moment-dönme eğrileri ile incelenmiştir. Deney adları ve kullanılan birleşim elemanlarının boyutları Tablo 1’de verilmiştir. Ayrıca, bu çalışma kapsamında yapılan deney sonuçları ile karşılaştırılacak T160 ve T200 isimli [13] T-elemanlı birleşim Şekil

3b’de görülmektedir. Bu deneylerdeki T160 birleşimi IPE160 profilinden ve T200 birleşimi de IPE200 profilinden kesilerek elde edilen T-elemanlarla oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında incelenen levha kalınlıkları da bu birleşimlerle aynı olması için 7,4 mm ve 8,5 mm seçilmiştir (IPE160 başlık kalınlığı 7,4 mm ve IPE200 levha kalınlığı 8,5 mm’dir).

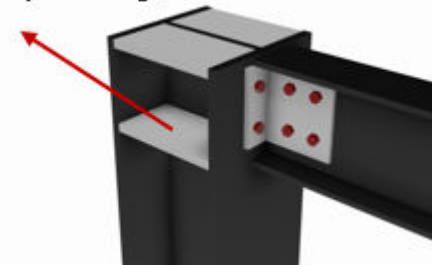
Tablo 1. Deneylerde kullanılan birleşim elemanlarının boyutları (element dimensions of connections used in experiments)

Deney Adı	E160	E200
H (mm)	300	
X (mm)	160	
Y1(mm)	75	
Y2(mm)	75	
Bulon çapı (M8.8)	10	
tp (mm)	6	
Kiriş profili	IPE160	
Kolon profili	HEB160	
t (mm)	7,4	8,5



Şekil 3a. Kiriş gövdesinde berkitmeli alın levhalı birleşim (Web-stiffened end-plate connection)

T-eleman başlık kalınlığı, t



Şekil 3b. T-elemanlı birleşim [13] (T-stub connection)

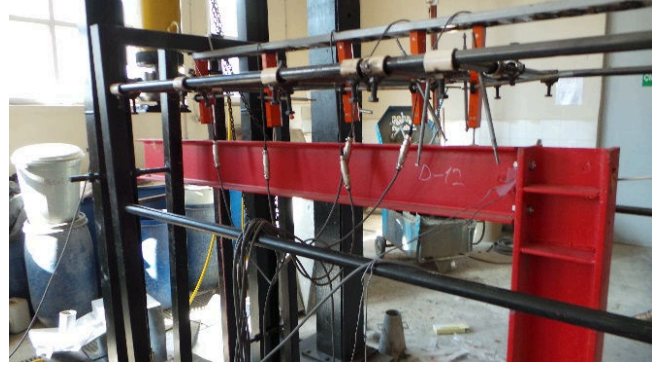
2.2. Deney Düzenegi (Test Set-up and Procedure)

Bu çalışma Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılmıştır. Deney düzeneginde

hidrolik pompa, yükleme hücresi (loadcell-250 kN), deformasyon ölçüm cihazları (LVDTs-100 mm), gerinim pulları (strain gauges), veri toplama cihazı (datalogger) ve bilgisayar kullanılmıştır. Hidrolik pompa yükü yüklemek için kullanılmış ve yükleme hücre aleti, hidrolik pompaya bağlanmıştır. Gerinim pullarının kullanılacağı yer bu deneylerde metalik olduğundan, yüzey önce taşlanıp zımparalanmış sonra aseton, eter gibi eriticilerle yüzey yağından temizlenmiştir. Gerinim pulları için yaygın kullanılan iki bileşenli yapıştırıcılar ölçüm yapılacak yere sürülmüştür. Deneysel numuneleri (kiriş-kolon birleşimleri) bir çelik inşaat firması yardımıyla hazırlanmıştır. Zemin 2x1.5x1.5m boyutlarında kazılarak ankraj elemanları yerleştirilmiş ve çelik bağlantılı kütle betonu dökülmüştür. Deneylerde kolon laboratuvarındaki bu beton kütleyle ankraj edilmiştir. Çalışmada amaç sadece kirişin eğilme davranışından birleşimin moment-dönme davranışı elde etmek olduğundan, kolonun eğilmesini engellemek için kolon boyutu büyük seçilmiş; kirişin burulmasını engellemek için kiriş ucuna iki adet seyyar kolon bağlanmış ve bu kolonlara mesafeleri ayarlanabilen kutu profiller monte edilmiştir. Deformasyon cihazlarını sisteme bağlamak için çerçevesel sistem imal edilmiştir. Bunun yapılmasında ki amaç; deney esnasında deformasyon cihazlarını sabitlemek ve ölçüm hassasiyetinin korumaktır. Şekil 4a'da temel beton ankrajı detayları ve Şekil 4b'de deney düzeneği ile deney numunesi (kiriş-kolon birleşim) görülmektedir.



Şekil 4a. Temel beton ankrajı (Concrete anchorage)



Şekil 4b. Deney düzeneği ve deney numunesi (Test set-up and beam-to column connection)

2.3. Deneysel Verilerin Toplanması (Calculation of Experimental Database)

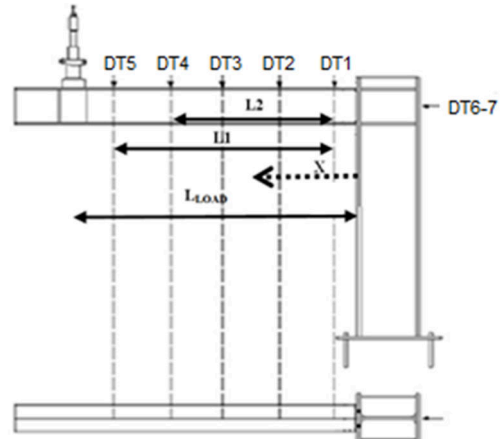
Deneylerden elde edilen veriler çeşitli matematiksel işlemlerle moment ve dönme değerlerine dönüştürülmüş, moment-dönme eğrileri çizdirilmiş ve moment-dönme eğrisinin temsil ettiği, rijitlik, dönme kapasitesi ve moment dayanımı ile ilgili bilgiler sunulmuştur. Bu çalışmada amaç moment-dönme davranışını incelemektir. Bu nedenle kirişin mesnetleri ankastre olacak ve mesnetlerdeki moment aşağıdaki formül ile hesaplanacaktır:

$$M=PL_{load} \quad (1)$$

Burada; P, yük ve L_{load} , yükün uygulandığı noktadan birleşim noktasına olan uzaklıktır. Birleşimdeki dönme Şekil 5'de görüldüğü gibi 5 dikey (DT1-DT5) ve 2 yatay (DT6-DT7) LVDT'lerle deplasmanlar ölçülerek aşağıdaki formüller ile hesaplanmıştır:

$$\theta = \frac{\arctan(\delta_{DT1}-\delta_{DT5}-\left(\frac{P}{EI}\left(\frac{X_{DT1}^3}{6}-\frac{L_{load}X_{DT1}^2}{2}\right)\right)}{L1} \quad (2)$$

Burada; I, kirişin atalet momenti ve E, elastisite modülüdür. θ , kirişin dönme değeri ve δ , kirişin deplasmanıdır.



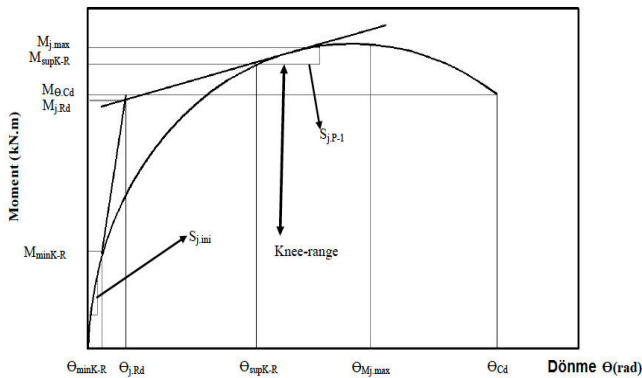
Şekil 5. Deney sistemi (Test arrangements)

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

3.1. Moment-Dönme Davranışı (Moment-Rotation Behaviour)

Şekil 6'da görülen moment-dönme eğrisi, eğilme momenti ($M_{j,Rd}$) ile bu momente tekabül eden dönme ($\Theta_{j,Rd}$), maksimum moment ($M_{j,max}$) ile bu momente tekabül eden dönme ($\Theta_{Mj,max}$) ve eğilme moment kapasitesi ($M_{\Theta,Cd}$) ile bu momente tekabül eden dönme (Θ_{Cd}) arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır [14]. Bir moment-dönme eğrisinden öne çıkan özellikler:

1. Maksimum moment dayanımı ($M_{j,max}$); moment-dönme eğrisindeki maksimum momente eşittir.
2. Moment dayanımı ($M_{j,Rd}$); moment-dönme eğrisinde elastik bölgeden çizilen teğet ile plastik bölgeden çizilen teğetin keşişim noktasındaki moment değeridir.
3. Dönme rijitliği (S_{ij}); sekant rijitliğidir. Elastik bölgenin eğiminin (başlangıç rijitliği) plastik bölgenin eğimine oranıdır. ($S_{ij} = S_{j,ini}/S_{j,p-1}$).
4. Dönme kapasitesi (Θ_{Cd}); moment-dönme eğrisindeki maksimum dönmeye eşittir.
5. Birleşim duktilitesi (Ψ_j); dönme kapasitesinin dönme moment dayanımındaki dönmeye oranına eşittir ($\Psi_j = \Theta_{Cd}/\Theta_{j,Rd}$).
6. Birleşim maksimum yük duktilitesi (Ψ_{jmax}); maksimum momentteki dönmenin moment dayanımındaki dönmeye oranına eşittir ($\Psi_{jmax} = \Theta_{Cd}M_{j,max}/\Theta_{j,Rd}$).
7. Knee bölgesi; elastik bölge sınırına çizilen teğet ile plastik bölge sınırına çizilen teğet noktasının arasında kalan mesafeye denir.



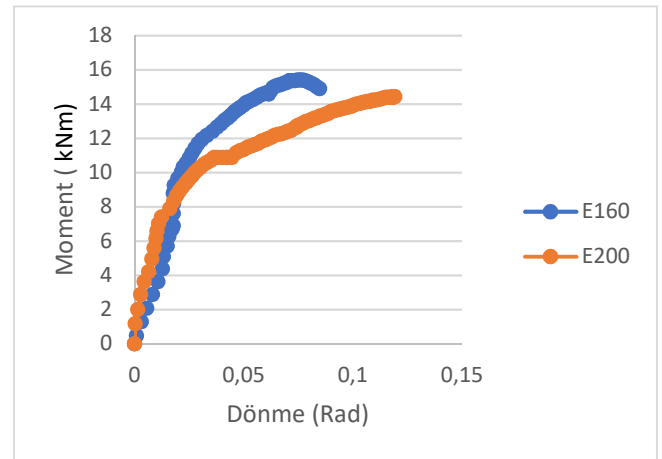
Şekil 6. Moment-dönme eğrisi karakteristikleri [7]
(Characteristics of moment-rotation curve)

Tablo 1'de tanımlanan 2 adet deney gerçekleştirilmiş, Şekil 7'de bu deneyler için önerilen birleşimlerin moment-dönme eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Tablo 2'de bu deneylere ait moment-dönme eğrisinin

karakteristik değerleri ve Şekil 8'de ise önerilen birleşimler ile T-element birleşimlerin moment-dönme eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2. Moment-dönme eğrisi karakteristik değerleri
(characteristic values of moment-rotation curve)

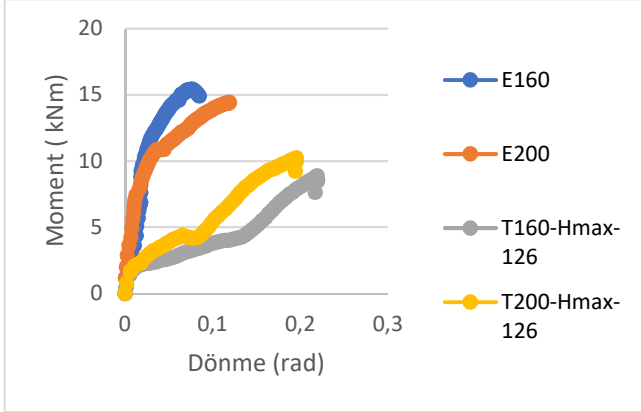
Deney adı	E160		E200			
	E160	E200	T160-Hmax-126 [13]	T200-Hmax-126 [13]		
Knee bölgesi aralığı	4,38-14,28	4,22-12,47	1,82-8,35	2,07-8,55		
Dayanım (KNm)	$M_{j,Rd}$	13,81	10,89	2,38	4,78	
	$M_{j,max}$	15,42	14,44	8,91	10,25	
	$M_{\Theta Cd}$	14,91	14,44	7,64	9,23	
Rijitlik (KN m/rad)	$S_{j,ini}$	6,91	2,81	3,05	3,29	
	$S_{j,p-1}$	0,099	0,16	0,55	0,46	
	$S_{j,ini}/S_{j,p-1}$	9,13	17,11	5,68	7,2	
Dönme (rad)	$\Theta_{j,Rd}$	0,037	0,016	0,013	0,022	
	$\Theta_{Min.K.R}$	0,012	0,006	0,0094	0,0108	
	$\Theta_{Msup.k.R}$	0,054	0,071	0,206	0,147	
	$\Theta_{Mj,max}$	0,077	0,118	0,219	0,195	
	Θ_{Cd}	0,085	0,119	0,219	0,195	
Ψ_j	2,29	7,44	16,85	8,86		
$\Psi_{j,max load}$	2,08	7,38	16,85	8,86		
Enerji Kapasitesi (kNmrad)	Yutma		0,63	0,86	0,98	1



Şekil 7. E160 ve E200 birleşimlerinin moment-dönme eğrileri
(moment-rotation curves of E160 and E200 connections)

Bu çalışma kapsamında yapılan E160 ve E200 deneyleri için Tablo 2'de görüldüğü gibi birleşimlerin alın levhası kalınlığı arttıkça süneklik %225,32, maksimum süneklik %256,25 ve enerji yutma kapasitesi %36,51 artmıştır. Deney numunelerinin dayanımları birbirleriyle

karşılaştırıldığında, alın levhasının kalınlığı arttıkça M_{jRd} nin %26,81 oranında, $M_{\Theta cd}$ nin %3,15 oranında ve M_{jmax} nin %6,35 oranında azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak alın levha kalınlığı arttıkça dayanım oranının azaldığı görülmüştür. Ayrıca alın levhasının kalınlığı arttıkça rijitlik oranı da %87,40 artmıştır. Dönme oranları ise, alın levhasının kalınlığı arttıkça $\Theta_{Mj,max}$ 'da %53,24 ve Θ_{Cd} 'da %40 artmıştır. Sonuç olarak, alın levhasının kalınlığının artması moment dayanımını azaltırken, dönme kapasitesini artırmıştır.



Şekil 8. E160, E200, T160-Hmax-126 ve T200-Hmax-126 birleşimlerin moment-dönme eğrileri (Moment-rotation curves of E160, E200, T160-Hmax-126, and T200-Hmax-126 connections)

Bu deney sonuçları, T-elemanlı birleşim deney sonuçları ile karşılaştırıldığında; E160 ve T160-Hmax-126 ile E200 ve T200-Hmax-126 karşılaştırıldığında sırasıyla maksimum moment % 73 ve %41 artarken, maksimum dönme %61 ve %39 azalmıştır. Yine sırasıyla rijitlik %61 ve %137 artarken, enerji yutma kapasitesi %36 ve %14 oranında azalmıştır. Böylece, alın levhalı birleşimde gövde de berkitme kullanımı, birleşimi T şeklinde yapıp gövdeden bulonlamaktan daha rijit yaparken enerji yutma kapasitesini de azalmıştır.

3.2. Göçme Şekilleri (Failure Modes)

E160 ve E200 birleşimlerinin her ikisinde de göçme üst bulon kırılması ile meydana gelmiştir. Ayrıca, Şekil 9'da görüldüğü gibi alın levhası, kullanılan berkitme levhasının etkisiyle sinüs şeklini alarak deforme olmuştur. Yani berkitme levhasının olduğu bölge kirişe bağlantı olması dolayısıyla bu şekli almıştır. E160 deneyinde yani alın levhası kalınlığının az olduğu birleşimde alın levhası daha fazla sinüs şeklini alırken alın levhasının kalın olduğu birleşim daha rijit davranmıştır. T-elemanla yapılan birleşimlerin Şekil 10'da görülen göçme şekillerine

bakıldığında alın levhalı bileşim ile aynı göçme davranışını gösterdiği görülmektedir. Kırılma üst bulonlardadır ve bulonlar başlığa yakın alanlardan kırılmışlardır. T-elemanlı birleşimlerde gövde 2 sıra bulonlu bağlı olduğundan T-elemanın başlığı üst bulon ucundan eğilmiştir. Fakat alın levhalı birleşimlerde ortadan levha ile kaynaklı olduğundan sinüs şeklini almışlardır.



Şekil 9a. E160 birleşimi için göçme şekilleri (Failure modes for E160 connection)



Şekil 9b. E200 birleşimi için göçme şekilleri (Failure modes for E200 connection)



Şekil 10a. T160-Hmax-126 birleşimi için göçme şekilleri [13] (Failure modes for T160-Hmax-126 connection)



Şekil 10b. T200-Hmax-126 birleşimi için göçme şekilleri [13] (Failure modes for T200-Hmax-126 connection)

4. SONUÇ (CONCLUSION)



Bu çalışmada, önerilen alın levhalı birleşimin davranışını temsil eden moment-dönme eğrisinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneyler göstermiştir ki, birleşimin moment-dönme eğrisi birleşim elemanının boyutlarına göre değişmektedir. Buna bağlı olarak birleşimin eleman boyutlarındaki farklılığın moment-dönme eğrisinin temsil ettiği rijitlik, moment dayanımı, süneklik ve enerji yutma kapasitesi vs ne ölçüde değiştirdiği ile ilgili bilgi edinilmektedir. Bu çalışma kapsamında önerilen, berkitme levhası kiriş gövde ve alın levhasına kaynaklanan alın levhalı birleşimler benzer göçme modları gösteren birleşim tiplerine göre daha az dönme ve enerji yutma kapasitesine sahip olmaktadır. Ayrıca bu birleşimlerde alın levhasının kalınlığının artması birleşimin rijitliğini de artırmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma kapsamında profil temini ve işçilik desteklerinden dolayı Gençler Metal Ltd. Şti.' ye ve deneyler süresince yardımını esirgemeyen Prof. Dr. A. Cüneyt Aydın, Dr. Mahyar Maali ve Mahmut KILIÇ' a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Sağıroğlu and A. C. Aydın, "Design and analysis of non-linear space frames with semi-rigid connections," *Steel and Composite Structures*, vol. 18, no. 6, pp. 1405-1421, 2015.
- [2] C. Ngo-Huu, P. Nguyen and S. Kim, "Second-order plastic-hinge analysis of space semi-rigid steel frames," *Thin-Walled Structures*, vol. 60, pp. 98-104, 2012.
- [3] B. S. Dhillon and J. W. O'Malley, "Interactive design of semi-rigid steel frames," *Structural Engineering*, vol. 125, pp. 556-564, 1999.
- [4] J. Davison, B. P. Kirby and A. Nethercot, "Rotational stiffness characteristics of steel beam-to-column connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 8, pp. 17-54, 1987.
- [5] M. J. Frye and G. A. Morris, "Analysis of flexibly connected steel frames," *Canadian Journal of Civil Engineering*, no. 2, pp. 280-291, 1975.
- [6] M. Maali, M. Kılıç, M. Sağıroğlu and A. C. Aydın, "Experimental model for predicting the semi-rigid connections behavior with angles and stiffeners," *Advances in Structural Engineering*, vol. 20, no. 6, pp. 884-895, 2017.
- [7] A. C. Aydın, M. Kılıç, M. Maali and M. Sağıroğlu, "Experimental assessment of the semi-rigid connections behavior with angles and stiffeners," *Journal of Constructional Steel Research*, no. 114, pp. 338-348, 2015.
- [8] A. Abidellah, A. Bouchair and D. E. Kerdal, "Experimental and analytical behavior of bolted end-plate connections with or without stiffeners," *Journal of Constructional Steel Research*, no. 76, pp. 13-27, 2012.
- [9] A. M. G. Coelho, F. S. K. Bijlard and L. S. Silva, "Experimental behavior of high strength steel end-plate connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, pp. 1228-1240, 2007.
- [10] Y. Shi, G. Shi and Y. Wang, "Experimental and theoretical analysis of the moment-rotation behavior of stiffened extended end-plate connections," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 63, pp. 1279-1293, 2007.
- [11] M. D'Aniello, R. Tartaglia, S. Costanzo and R. Landolfo, "Seismic design of extended end-plate joints in the framework of Eurocodes," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 128, pp. 512-527, 2017.
- [12] A. K. Dessouki, A. H. Youssef and M. M. Ibrahim, "Behavior of I-beam bolted extended end-plate moment connections," *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 4, pp. 685-699, 2013.
- [13] M. Sağıroğlu, M. Maali, M. Kılıç and A. C. Aydın, "Characteristics of Moment-Rotation Curves of Bolted T-Stub Connections: An Experimental Study," *Advances in Structural Engineering*, vol. 20, No 6 PP 884-895, 2017".
- [14] EN1993-1-8, Eurocode 8: Design of steel structures-Parts 1-8: General Rules-Design of joints, CEN, 2005

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Gelis/Received</u> 21-09-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 15-01-2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.339232 <u>Online Access</u>	

EMG ve jiroskop verileri ile endüstriyel robot kolunun gerçek zamanlı kontrolü

Kenan Erin¹, Barış Boru²

ÖZ

Gelişen teknoloji ile giyilebilir cihazlar üzerine geliştirme çalışmaları devam etmekte ve ticari ürünler piyasaya çıkmaya devam etmektedir. Bu çalışmaların önemli bir kısmı insan vücudundaki hareketleri algılayabilen giyilebilir sensörler üzerine odaklanmaktadır. Bu çalışmada Thalmic Labs tarafından üretilen Myo Armband ürünü ile insan kol hareketlerinin algılanması ve endüstriyel robot kolunu kontrol etmesi ile bir İnsan Robot Arayüzü geliştirilmiştir. Myo Armband bileklik şeklinde olup üzerinde bulunan EMG (Elektromiyografi) ve jiroskop sensörleri ile kolun hareketinin algılanmasında yardımcı olmaktadır. Myo Armband ile bilgisayar sistemi arasında kablosuz bağlantı kurularak ham EMG ve jiroskop verilerinin bilgisayara gönderilmesi mümkündür. Pratik çalışma için ABB firması tarafından üretilen IRB120 endüstriyel robotu kullanılmıştır. IRB120 endüstriyel robotu kendi kontrolörü dışında kontrol edilebilmektedir. Geliştirilen yazılım ile EMG ve jiroskop verilerinden elde edilen veriler hareket ve konum bilgilerine dönüştürülerek ethernet üzerinden gerçek zamanlı gönderilmesi ile endüstriyel robotun insan hareketlerini takip etmesi sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Electromyogram (EMG), Endüstriyel Robot, İnsan Robot Arayüzü(HRI), Jiroskop

Real time control of industrial robot arm with EMG and gyroscope data

ABSTRACT

Development efforts rising on wearable devices and commercial products has begun to appear to commercial market. This study is mainly focused on wearable sensors that can be used to measure human movements. In this study, a Human Robot Interface(HRI) was developed with the Myo Armband product by Thalmic Labs, with the perception of human arm movements. Myo Armband is bracelet shaped device and it helps to detect movements of the arm thanks to EMG(Electromyography) and gyroscope sensors on it. By establishing a wireless connection between Myo Armband and the computer system it is possible to send raw EMG and Gyroscope data to the computer. IRB120 industrial robot that produced by ABB Robotics company is used for practical tests. IRB120 industrial robot can be controlled besides its own controller. In study, EMG and gyroscope data has been obtained with software developed. These data is converted to movement and position data has been sent to robot arm over ethernet in order to follow the human movements

Keywords: Elektromyogram (EMG) , Industrial Robot, Human Robot Interface(HRI), Gyroscope

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojinin ilerlemesiyle giyilebilir cihazlar hayatımıza girmeye başlamıştır. Geliştirilen giyilebilir cihazların üretiminde ivmeölçer [1,2], jiroskop[3] ve kızılötesi[4] sensörler sıklıkla kullanılmaktadır. Bu tip sensörlerin kullanımıyla hareket algılama, mesafe algılama gibi fiziksel olaylar rahatlıkla tespit edilebilmektedir.

Robot teknolojisi dünyada hızlı gelişme gösteren alanların başında gelmektedir. Robotların gelişmesiyle firmalar robotların pazarlanmasında farklı özellikler geliştirmeye başlamışlardır. Özellikle akıllı sistemlerin robotlara entegre edilmesiyle robotlar kullanılmaya daha cazip hale gelip müşterilerin ilgisini çekmeye başlamıştır. Bu nedenle firmalar ve araştırmacılar insanların robotlarla haberleşmesi için insan robot arayüzü (HRI) geliştirmektedirler. HRI sistemlerin tasarımı ile ilgili yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Pedro ve arkadaşları yaptıkları çalışmada üzerinde 3 eksenli ivmeölçer bulunan Wii uzaktan kontrol kumandası ile alınan verileri yapay sinir ağları ile sınıflandırmış ve hareket kestiriminde bulunmuşlardır. Hareket kestiriminden sonra ethernet haberleşmesi ile MOTOMAN endüstriyel robotunun 3 boyutlu uzayda hareketini sağlamışlardır[5]. Wang ve arkadaşları EMG ve Kinect sensörü kullanarak insan benzetimli mobil robotun kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. EMG ve Kinect sensörden gelen veriler özellik çıkarma ve hareket tanımlama yöntemleriyle anlamlı hale getirilmiş olup motor sürücülerine gerekli bilgiler verilerek mobil robotun hareketini sağlamışlardır[6]. Beyda ve arkadaşları yüzey elektrotlar yardımı ile alınan sinyallerle biyonomik el simülatörü uygulamasını geliştirmişlerdir. Alınan sinyaller bant geçiren filtreden geçirilmiş ve iki temel hareketi(el açma ve kapama) temel bileşen analizi ile sınıflandırmışlardır. Daha sonra anlamlandırılan sinyaller MATLAB GUI programında on serbestlik derecesine sahip el simülatörünün kontrolünü sağlamışlardır.[7]. Yu ve arkadaşları iki WSSS IMU sensor ile HRI sistemi gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar kullanılan iki sensörden birini kolun ortantasyonunu göstermesi için insan koluna diğerini açı hesaplamak için çok yönlü tasarlanmış olan mobil robota entegre etmişlerdir. Daha sonra itme, çekme ve dönme hareketleriyle mobil robotun kontrolü sağlanmışlardır[8]. Zhao ve arkadaşları

kinect sensör kullanarak bir HRI sistemi geliştirmişlerdir. Kinect sensörden alınan görüntülerden Baxter robot manipülatörünün kontrolünü sağlamışlardır. Görüntülerden robotun aktuatörlerine sinyal göndermek için kolun açılarını tespit edip elde edilen açılardan UDP haberleşmesi ile insan robot arayüzünü gerçekleştirmişlerdir[9]. Liao ve arkadaşları EEG sensör tabanlı bir okçuluk oyunu geliştirmişlerdir. Yazarlar MINDO adı verilen EEG sensör ile beyin sinyallerini okumuşlardır. Okçuluk oyununda kişinin hedefe odaklanma seviyesini gösterip hedef kısa ve odaklanma miktarı yüksek ise kişinin yüksek puan almasını sağlamışlardır[10]. Umut ve arkadaşları kola yerleştirilen elektrotlar yardımıyla EMG tabanlı mobil robotun hareketini gerçekleştirmişlerdir. Elektrotlardan gelen sinyalleri dsPIC30F4013 mikroişlemcisinin analog kanallarından okuyup sinyallerle hareket sınıflandırması yapmışlar, hareketin türüne göre motorlara sinyaller göndermişlerdir[11].

Gürkan ve arkadaşları ALS (Amiyotrofik lateral skleroz) hastaları için akıllı tekerlekli sandalye geliştirmişlerdir. Bu tekerlekli sandalye için EMG, EEG ve göz hareketleri kullanılarak 3 farklı şekilde kontrol düzeneği geliştirmişlerdir. Sinyalleri almak için kablosuz haberleşme (bluetooth) kullanılmış ve sinyaller MATLAB ortamında işlenmiştir. Ayrıca güvenli navigasyonu sağlamak ve engellerden, tehlikelerden kaçınmak için tekerlekli sandalyeye bir adet Kinect sensörü yerleştirmişlerdir[12]. Aleotti ve arkadaşları endüstriyel robot kolunu kola takılan ShapeTape isimli sensor ile kontrol etmişlerdir. Sensörden aldıkları veriler ile kurdukları algoritma sayesinde Pandi-1 isimli robot manipülatörünün açılarını tespit edip robotu kontrol etmişlerdir[13]. Li ve arkadaşları EMG sinyallerini kullanarak exoskeleton robot kolunun kuvvet kontrolünü sağlamışlardır. Yazarlar dirsek ve bilek kaslarından belirledikleri kas çiftlerinden dört kanallı EMG sinyallerini 1024 Hz ile örnekleyerek toplamışlardır. Topladıkları sinyaller üzerinde çeşitli filtreler uygulayarak gürültüleri gidermişlerdir. Daha sonra filtrelenmiş sinyal üzerinde PI denetleyicisi uygulayarak kapalı çevrim kuvvet kontrolünü gerçekleştirmişlerdir[14].

Bu çalışmada ise Thalmic Labs tarafından üretilen Myo Armband ile ABB firması tarafından üretilen IRB120 endüstriyel robot kolunun gerçek zamanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de gösterilen Myo Armband üzerinde 8 adet EMG elektrot, 3

eksenli ivmeölçer, 3 eksenli jiroskop ve 3 eksenli manyetik kuvveti ölçen manyetometre bulunan bir bileklidir.



Şekil 1: Myo Armband[12]

Kola takılan bu bileklik ayrıca kolun 3 boyutlu uzayda oryantasyonunu gösterebilmektedir. Bileklikten alınan oryantasyon verileri bilgisayara kablosuz haberleşme (bluetooth) ile aktarılmaktadır. Alınan bu veriler Python programlama dilinde hazırlanan yazılım ile işlendikten sonra TCP/IP haberleşmesi ile endüstriyel robota ethernet vasıtası ile gerçek zamanlı olarak gönderilmektedir. Robotun güvenli kontrolü için ise EMG sinyalleri kullanılmış olup bu verilerle robotu başlatma, acil stop ve ana pozisyona dönmesi işlemlerinde yararlanılmıştır. Bu çalışma için kurulan deney düzeneğinin görsel şeması Şekil 2’ de gösterilmiştir.

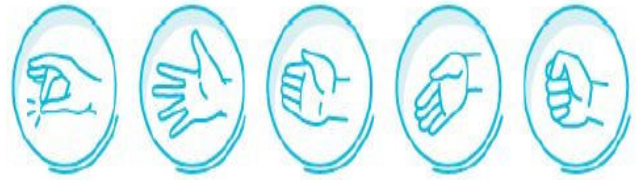


Şekil 2 : Deney düzeneğinin görsel şeması

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

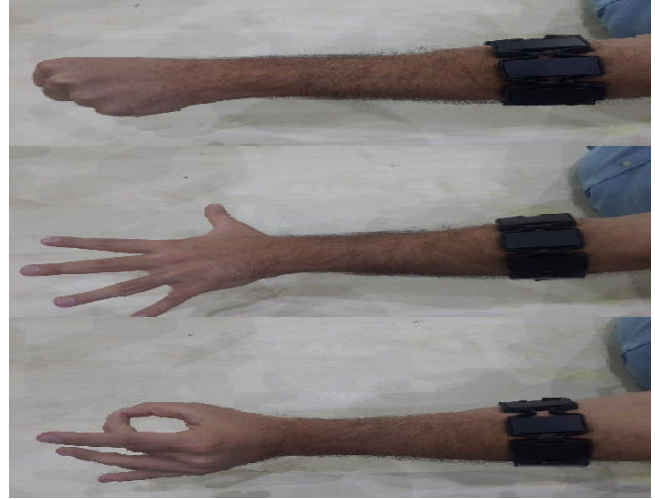
Elektromiyografi (EMG), sinir sistemi tarafından kontrol edilen ve kas hareketleri neticesinde kas ve sinirlerde ortaya çıkan elektriksel aktivitenin kaydedilmesine dayanan bir yöntemdir. EMG sinyalleri vücuttan elektrotlar yardımı ile alınırlar ve gerilim kuvvetlendiriciden geçirilerek

işlenirler. Kasların kasılma ve serbest durumlarından elde edilen sinyaller incelenerek çeşitli sınıflandırma algoritmaları ile istenilen hareketlerin tanımlanması sağlanabilmektedir. Myo Armband üzerinde bulunan sekiz farklı elektrot sayesinde bu sinyaller yüksek işleme ve sınıflandırma yöntemleri ile hareketler algılanabilir. Thalmic Labs tarafından üretilen yazılım geliştirme kiti kullanılarak EMG ve jiroskop verilerine ulaşmak mümkündür. EMG sinyallerini Thalmic Labs tarafından verilen arayüz ile sınıflandırabileceği gibi ham EMG verilerini kullanarak çeşitli sınıflandırma algoritmaları ile de sınıflandırabilmektedir. Myo Armband yazılım kiti tarafından Şekil 3 deki hareketler sınıflandırılmış ve kullanıcının kullanımına sunulmuştur.



Şekil 3 : Myo Armband tarafından tanınan hareketler[15]

Bu çalışmada Myo Armband tarafından tanımlanan beş farklı hareketten yumruk robotu çalıştırma, eli serbest bırakma robotu durdurma ve çift parmak dokunma da robotu başlangıç pozisyonuna götürmek için kullanılmıştır. Robotu kontrol etmek için kullanılan hareketler Şekil 4’ de gösterilmiştir.



Şekil 4: Robotu kontrol etmek için kullanılan hareketler

EMG hareketlerinin tanımlanmasından sonra robotun üç boyutlu uzayda hareketini sağlamak için Myo Armband üzerinden bulunan ivmölçer ve jiroskop sensörlerinden yararlanılmıştır. Kola takılan Myo Armband üç boyutlu uzayda yönelimini gösteren dört elemanlı kuaterniyon

matrisini anlık olarak aktarabilmektedir. Kuaterniyon matrisi 4 boyutlu bir matris olup cismin 3 boyutlu uzayda oryantasyonunu belirtmek için kullanılır. Kuaterniyon matrisi robotik[16] ve kontrol[17] başta olmak üzere bir çok alanda kullanılmaktadır. Kuaterniyon matrisinin diğer oryantasyon gösterimlerinden en önemli farkı robotun ters kinematik hesabı yapılırken tekil noktaların oluşmaması ve hesaplama yükünün daha az olması gösterilmektedir. Kuaterniyon matrisi gösterimi denklem 1’de gösterilmiştir.

$$q = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3] \quad (1)$$

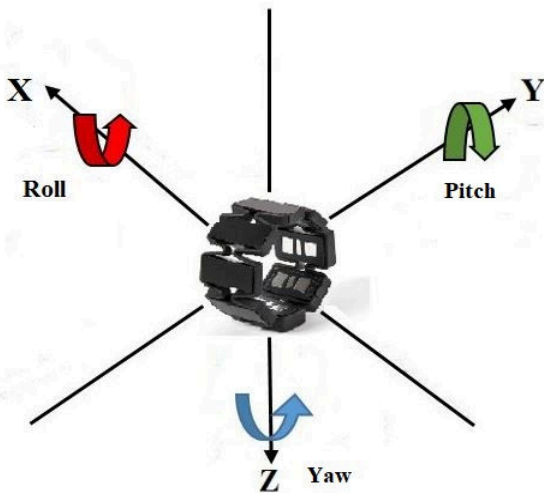
Kol bandından alınan kuaterniyon matrisi bize robotun üç boyutlu uzayda yönelimini sağlayan Euler açılarına (roll, pitch, yaw) dönüştürmemize yardımcı olmaktadır. Myo Armbandtan alınan sinyaller 20Hz örnekleme frekansı ile kablosuz haberleşme (bluetooth) ile bilgisayara aktarılmaktadır. Python programlama ortamında geliştirilen yazılım ile matematiksel dönüşüm fonksiyonları kullanılarak kuaterniyon matrisinden Euler açılarına dönüştürülmüştür. Kuaterniyon matrisinden Euler açılarına dönüşüm matrisleri denklem 2, denklem 3 ve denklem 4’de gösterilmiştir.

$$roll = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot (q_1 \cdot q_2 + q_0 \cdot q_3)}{q_3^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_0^2} \right) \quad (2)$$

$$pitch = \sin^{-1}(-2 \cdot (q_0 \cdot q_2 - q_1 \cdot q_3)) \quad (3)$$

$$yaw = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot (q_0 \cdot q_1 + q_3 \cdot q_2)}{q_3^2 - q_2^2 - q_1^2 + q_0^2} \right) \quad (4)$$

Myo Armband kullanılarak kolun hareket ettirilmesiyle oluşan Euler açıları Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5 : Myo Armband Euler açıları

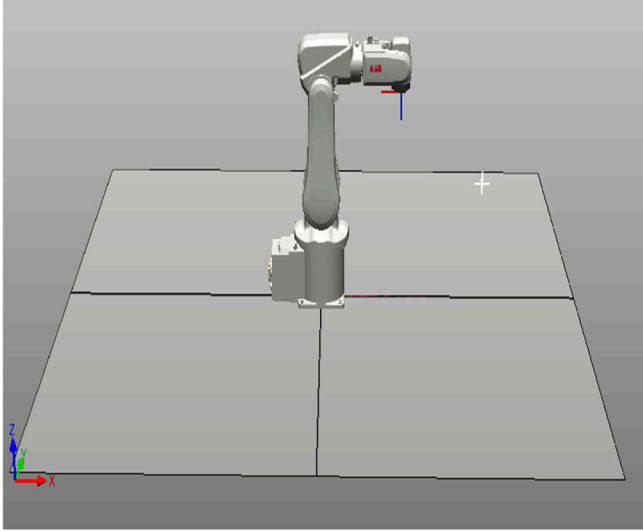
Myo Armband hareket ettirildiğinde Euler açıları -90 ile $+90$ derece arasında değişim göstermektedir. Bu açı değişiminin robot için hareket pozisyonuna dönüştürülmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmada robotun üç ekseninde gidebileceği maksimum koordinatlar tespit edilmiş olup dönüşüm fonksiyonu ile açı bilgisinden pozisyon bilgisine dönüşüm sağlanmıştır. Bu sayede robot X ekseninde 1,6 mm/derece Y ekseninde 2,7 mm/derece ve Z ekseninde 2,2 mm/derece oranlarında hareket etmektedir.

HRI sistemlerinde yaşanan en önemli sıkıntılar robotun hareket alanı dışına çıkarılmaya çalışılması ve robotun eksenlerinin aldığı pozisyon sonucunda robotun tekilliğe yaklaşmasıdır. Bu çalışmada robotun hareket dışına çıkarılmaması için robot X, Y ve Z eksenlerinde belirli koordinatlardan sonra hareket edememesi yazılımsal sağlanmıştır. Ayrıca robotun eksenlerinden kaynaklı tekilliliğe yaklaşmaması için de robotun flanşının 5. Eksene dik bir şekilde aşağıya bakması sağlanmıştır. Bu çözümler sayesinde robotun üç boyutlu uzayda hata vermeden istediğimiz koordinata gitmesi sağlanmıştır.

Myo Armband ile alınan EMG ve oryantasyon verileri Python ortamında işlendikten sonra robota gerçek zamanlı veriler göndermek için TCP/IP protokolü kullanılarak ethernet üzerinden haberleşme yapılmıştır. TCP, Transmission Control Protokol (İletim Kontrol Protokolü) ve IP, Internet Protocol (İnternet Protokolü) terimlerinin kısaltmasıdır. TCP’nin temel görevi bütün verilerin doğru şekilde alınmasını sağlamak IP’nin görevi ise verileri doğru şekilde adreslenmesini sağlamaktır[18]. TCP/IP haberleşmesinde bir A bilgisayarı bir B bilgisayarına istediği veriyi paketler halinde gönderir. A bilgisayarının gönderdiği paketlere IP paketleri denir ve A’nın adresine IP adresi denir. Gönderilen paketler içerisinde B’nin adresi olduğu için paketler istenilen adrese yönlendiriciler vasıtasıyla gönderilir[19].

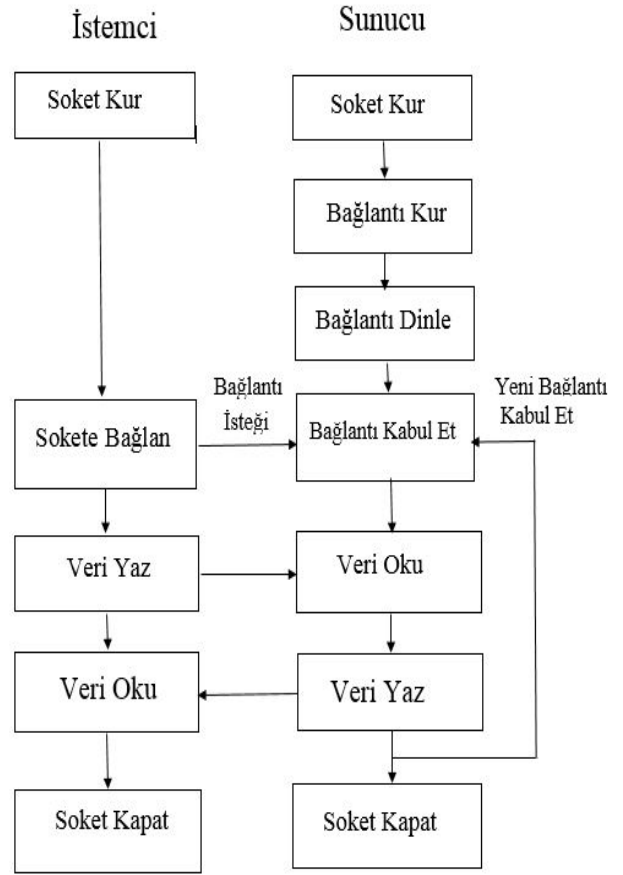
TCP/IP haberleşme protokolü endüstriyel otomasyonda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır[20-21]. Çalışmamızda Myo Armband ile alınan sinyaller Python ortamında işlendikten sonra gerçek zamanlı olarak ethernet üzerinden IRB120 endüstriyel robotuna gönderilmiştir. Çalışma ilk önce ABB firması

tarafından geliştirilen RobotStudio programında denenmiştir. RobotStudio programı ABB tarafından üretilen tüm endüstriyel robotların programlanmasını, kapsamlı simülasyonunu ve CAD programlarında tasarlanan fikstürlerin sanal ortamda kullanılmasını sağlayan bir programdır. RobotStudio ortamında kullanılan IRB120 endüstriyel robotu ve ev pozisyonu olarak tercih edilen yaklaşıma göre eksen duruşları Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5: RobotStudio programında IRB120 ve ev pozisyonu
IRB120 robotu ABB firması tarafından geliştirilen RAPID programlama dilini kullanarak programlanabilmektedir. RAPID programlama dili robotun hareket komutlarını, robotun üzerinde bulunan IO kartını kullanmak için gerekli komutları ve robotun üzerine etkiyen kuvvet, tork gibi fiziksel değerlere değerlendirebilecek ve aktarabilecek yapıda geniş kapsamlı bir programlama dilidir[22]. IRB120 robotunu robotun kumandası olan teach pendant, Robotstudio arayüzü ve 3. parti programlar(Python, C++ vb.) ile programlayabiliriz.

Çalışmamızda robotu programlayabilmek için Python programlama dili ile RAPID dili arasında TCP/IP haberleşme protokolü uygulanmıştır. Haberleşmede ilk önce bilgisayar dinleyici olarak davranmaktadır. IRB120 robotu ise istekte bulunmaktadır. Dinleyen taraf sunucu(bilgisayar) istekte bulunan taraf ise istemci(IRB120) olarak adlandırılır. Sunucu ve istemci arasında geçen haberleşme sıralaması Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6 : Sunucu – İstemci haberleşme sıralaması

Bilgisayar ve robot arasındaki haberleşmede Python programında Myo Armband ile elde edilen veriler sayısal olarak elde edilmektedir. TCP/IP haberleşmesinde verilerin karakter olarak gönderilmesi gerekmektedir. Bu şartı sağlamak için sayısal olarak elde edilen pozisyon bilgisi karaktere dönüştürülüp endüstriyel robota gönderilmektedir. Robota karakter olarak gelen verilerin robotu kontrol edilebilmesi için RAPID programlama dili ile tekrardan sayısal değerlere dönüştürülüp robot hareket ettirilmektedir. Euler açıları olan roll, pitch ve yaw açılarını robotta eksen olarak sırasıyla X,Y ve Z eksenlerini lineer kontrol etmek için kullanılmıştır. RobotStudio ortamında kontrol edilen robot gerçek zamanlı olarak da Şekil 7 ‘de kontrol edilmektedir.



Şekil 7 : IRB120'nin gerçek zamanlı kontrolü

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada giyilebilir ürün olan EMG bileklikle endüstriyel robotun kontrolü üzerinden çalışılmıştır. Çalışmada operatöre kullanım kolaylığı sunan bir İnsan Robot Arayüzü (HRI) oluşturulmuştur. Çalışma ilk önce RobotStudio ortamında denenmiş ve başarılı bir şekilde çalışmıştır. RobotStudio simülasyon ortamında güvenli sınırlar, değişik hızlar RobotStudio ortamında kontrol edildikten sonra gerçek IRB120 robotu üzerinde çalışma gerçekleştirilmiştir. IRB120 robotunun gerçekte yüksek hızlarda hareket ettirmek ani hareketlerde robotun üzerinde oluşan eylemsizlik kuvveti nedeniyle mekanik sorunlar oluşturabilmektedir. Bu sebeple gerçek robot üzerinde çalıştırmada düşük hızlarda hareket ettirilmiş ve sistemin başarılı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir.

Yapılan çalışmada robot kolunun 0.2 mm hassasiyet ile çalıştırılabildiği gözlemlenmiştir. Hız ve çalışma sınırları kriterlerine göre değerlendirme yapıldığında sistemde iyileştirmelere ihtiyaç bulunmaktadır. İleri ki çalışmalarda insan kol hareket hızının bir akıllı uygunlaştırma ardından sınırlandırılması gönderilmesi ve 3 boyutlu derinlik kamerası ile EMG, jiroskop verilerinin beraber kullanılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] B. Sevinç and G. Tulum, "Biyogüvenlik Kabinleri için Uzaktan Kontrollü Robotik Kol Tasarımı," Electric Electronic Computer Science Biomedical Engineerings Meeting , 2017.
- [2] H. Sökün , H. Kalkan, B. Çetişli,"İvmeölçer sinyalleri ile fiziksel aktivitelerin sınıflandırılması " Signal Process. Commun. Appl. Conf., pp. 3–6, 2012.
- [3] Q. An , Y. Ishikawa, J. Nakagawa, A. Kuroda, "Evaluation of wearable gyroscope and accelerometer sensor " RO-MAN, pp 731-736, 2012.
- [4] M. Kam, X. Zhu, P. Kalata, "Sensor fusion for mobile robot navigation,"SICEICASE International Joint Conference, vol. 85, no. 1, pp. 108–119, 2006.
- [5] P. Neto, N. Pires, A. Paulo," High level programming and control for industrial robotics: using a hand-held accelerometer-based input device for gesture and posture recognition", Industrial Robot: An International Journal, vol. 37, no. 2 , pp. 137-147, 2010.
- [6] B. Wang, C. Yang, Q. Xie,"Human-machine interfaces based on EMG and Kinect applied to teleoperation of a mobile humanoid robot", Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation", 2012.
- [7] B. Taşar, T. Kaya, A. Gülten, "EMG tabanlı el hareketinin analizi aracılığı ile robot el simülatörünün kontrolü", 22nd Signal Processing and Communications Applications Conference, 2014.
- [8] Q. Yu, Z. Lu , C. Liu, H. Wang,"Human robot interface based on WSSS IMU sensors", International Conference on Cyber Technology in Aumation, Control and Intelligent Systems,2015.
- [9] L. Zhao, Y. Liu, K. Wang, P. Liang, R. Li, "An Intuitive Human Robot Interface for Tele-operation", International Conference on Real-time Computing and Robotics, pp. 454-459, 2016.
- [10] L. Liao, C. Chen, J. Wang, S. Chen, S. Li, B. Chen, J. Chang, C. Lin,"Gaming control using a wearable and wireless EEG-based

- brain-computer interface device with novel dry foam-based sensors.”. Journal of Neuroengineering and Rehabilitation, 9(1).
- [11] U. Mayetin, S. Küçük, Ö. Şayli, “EMG Kontrollü Mobil Robot Uygulaması”, Medical Technologies National Conference(TIPTEKNO),pp. 1-4, 2015
- [12] G. Kucukyildiz, H. Ocak, S. Karakaya, O. Sayli, “Design and Implementation of a Multi Sensor Based Brain Computer Interface for a Robotik Wheelchair”, Journal of Intelligent & Robotic Systems,pp. 247-263, 2017.
- [13] J. Aleotti, A. Skoglund, T. Duckett, “Position teaching of a robot arm by demonstration with a wearable input device”, International Conference on Intelligent Manipulation and Grasping, 2004.
- [14] Z. Li, B. Wang, F. Sun, C. Yang, “ sEMG based joint force control for an upper-limb power assist exoskeleton robot”, IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics, vol. 18, no. 3, pp. 1043-1050, 2014.
- [15] <https://store.myo.com/>, Erişim Tarihi : 10.08.2017.
- [16] E. Sarıyıldız ,”A new approach to inverse kinematic solutions of serial robot arms based on quaternions in the screw theory framework”, Yüksek Lisans Tezi, Mekatronik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2009.
- [17] S. Joseph, C. Yuan, “ Closed loop manipulator control using quaternion feedback”, IEEE Journal on Robotics and Automation, vol. 4, no. 4, pp. 434-440, 1988.
- [18] Ş.Akkaya, O. Akbatı, A. F. Ergenç, ”Endüstriyel Sistemleri için FGPA Tabanlı Modbus Ağ Geçidi Tasarımı ve Uygulaması”, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, pp. 445-451, 2015
- [19] T. Bir, “Endüstriyel Veri İletişiminde TCP/IP Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi , Elektrik Elektronik Mühendisliği, İstanbul Teknik Üniversitesi,2005.
- [20] W. Nocon, “General-Purpose PC-Based Sequencing Controller With TCP/IP Communication”, IFAC Proceedings, vol. 36, no. 1, pp 73-78, 2003.
- [21] N. A. M. Noh, A. Saparon, H. Hashim, “Real Time FPGA Communication System Using Ethernet for Robotics”, Procedia Computer Science, vol. 76, pp. 406-410, 2015.
- [22] ABB, Technical reference manual RAPID instructions, functions and data types, Document ID : 3HAC 16581-1, Revision : J.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 06.02.2018 <u>Kabul/Accepted</u> 05.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.290340	

Nano iletişim teknolojilerinin biyomedikale katkısı

Mustafa Alper Akkaş^{*1}

ÖZ

Nano teknoloji biyomedikal alanında birçok yeni çözümler vaat etmektedir. Nano ölçek de, bir nano makinede en temel fonksiyonları yerine getirebilen bir birimdir. Nano makineler arası iletişim, dağıtılmış şekilde nano makinelerin daha karmaşık fonksiyonlarını yerine getirmesine izin verir. Bio-Nano nesnelerin interneti ise, geliştirmek için yeni zorlukların beklediği, verilerin güvenli bir şekilde değiştirilip, işlenip ve biyokimyasal alan içerisinde iletişim kurabileceği aynı zamanda internet ara yüzüne verilerin ulaştırılabileceği bir paradigma-kayması konseptidir. Bu makalede ileri teknoloji ürünleri olan Moleküler Haberleşme ve Bio-Nano Nesnelerin İnterneti, nano makineler arasındaki nano haberleşme temel alınarak anlatılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nano ağlar, Nano teknoloji, Moleküler Haberleşme, Bio-Nano Nesnelerin İnterneti, Nano Telsiz Duyarga Ağları

Contribution of communication technology to the biomedical field

ABSTRACT

Nanotechnology promise new solutions for several applications in the biomedical field. At the nanoscale, a nanomachine is considered as the most basic functional unit. Communication among nanomachines will allow them to accomplish more complex functions in a distributed manner. The Internet of Bio-Nano Things, stands as a paradigm-shifting concept, where novel challenges are faced to develop efficient and safe techniques for the exchange of information, interaction, and networking within the biochemical domain, while enabling an interface of the Internet. In this paper, the state of the art in molecular communication and Internet of Bio-Nano Things are reviewed to motivate the study of nano communication among nanodevices.

Keywords: Nanonetworks, Nanotechnology, Molecular Communication, Internet of Bio-Nano Things, Wireless Nanosensor Networks

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bolu, Türkiye - alperakkas@ibu.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1959 yılında Nobel ödüllü fizikçi Richard Feynman ‘Aşağıda Oldukça Fazla Yer Var!’ (There’s Plenty of Room at the Bottom!) başlıklı konuşmasında, eğer nano boyutlarda üretim yapılabilirse birçok yeni keşiflerin doğabileceğini söylemiştir[1]. Feynman konuşmasında, nano ölçekte özel ölçme ve üretim yöntemlerinin geliştirilmesi gerektiğini özellikle vurgulamıştır. Feynman’ın bu konuşması nano bilim ve nano teknolojinin başlangıcı kabul edilmektedir.

Feynman’ın konuşmasında üzerinde durduğu konu başlıkları şöyle özetlenebilir:

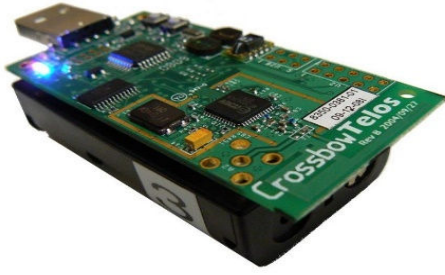
- 24 ciltlik Brittanica Ansiklopedisinin toplu iğne başı kadar büyüklükte bir yere sığdırabileceği,
- Küçük boyutun nasıl tanımlanması gerektiği,
- Küçük boyuttaki bilgi,
- Elektron mikroskopunun daha iyi geliştirilebileceği,
- Fevkalade biyolojik yapıların tasarlanabileceği,
- Bilgisayarların boyut olarak daha da küçüleceği,
- Minyatürleştirilen buharlaştırma ile de yapılabilmesi,
- Yağlama sorunları,
- Yüzlerce minik el,
- Atomları yeniden düzenleme,
- Küçük bir dünyadaki atomlar

Feynman konuşmasını şöyle bir örnekle bitirmiştir: Bir lisenin öğrencileri bir toplu iğne başına “iyi mi ?” yazısını yazıp, rakip lise öğrencilerine göndermişlerdir. Rakip lise ise “iyi mi?” yazısının i harflerinden birisinin noktası içine “o kadar da değil!” yazısını yazıp geri göndermiştir. Feynman gerçekleşmesini istediği bu düşünceler için farklı düzeylerde yarışmalar düzenlemiş ve kısa sürede istediği hedeflere ulaşan öğrenciye 1000 dolar ödül vermiştir. Bu konuşma; önemli gelişmelerin, hayal gücü geniş, ufku açık insanlar tarafından gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Günümüzde Feynman’ın birçok hayali gerçek olmuştur, fakat daha kat edilmesi gereken çok mesafe vardır.

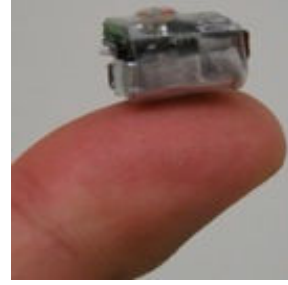
Telsiz duyurga ağları ise Feynman’ın ön gördüğü gibi yıllara göre boyutlarında küçülecek şekilde tasarlanmış ve üretilmiştir. Tablo 1 de telsiz duyurga ağlarının boyutlarına göre sıralanması gösterilmektedir. Şekil 1 de gösterildiği gibi 2004 yılında üretimi gerçekleşen TelosB düğümleri 3.20 cm genişlik, 6.55 cm uzunluk, 0.66 cm yüksekliğe sahip iken; 2008 yılında tasarlanan EcoMote ise 1.30 cm genişlik, 1.10 uzunluk, 0.70 cm yüksekliğe sahiptir. 4 yıl gibi kısa bir sürede telsiz duyurga düğümün boyutu üçte birden fazla küçültülebilmektedir. Gelecekte tasarlanması istenen nano düğümlerin ise birçok yönden alt yapısı hazırdır. Tablo 1’de aynı boyut sınıfında olan telsiz duyurga düğümleri aynı ton renkte gösterilmiştir.

Tablo 1. Telsiz duyurga ağlarının boyutlarına göre sıralanması (Comparing mote size for wireless sensor network)

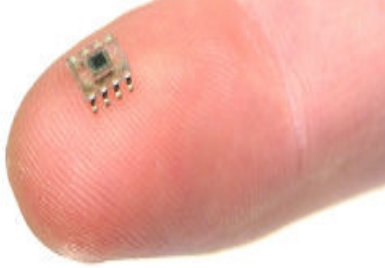
Düğüm	Boyut
TelosB [2]	3.20 cm x 6,55 cm x 0.66 cm (GxUxY)
Tmote Sky[3]	3.15 cm x 6.47 cm x 0.60 cm (GxUxY)
Mica2 [4]	3.17 cm x 5.71 cm x 0.63 cm (GxUxY)
MicaZ [4]	3.17 cm x 5.71 cm x 0.63 cm (GxUxY)
Imote2 [5]	3.60 cm x 4.80 cm x 0.90 cm (GxUxY)
SHIMMER [6]	2.03 cm x 4.44 cm x 1.27cm (GxUxY)
IRIS [2]	3.17 cm x 5.71 cm x 0.63 cm (GxUxY)
Sun SPOT [7]	6.35 cm x 3.81 cm x 2.54 cm (GxUxY)
Monnit [8]	2.00 cm x 2.64 cm x 4.50 cm (GxUxY)
LORD MicroStrain's [9]	4.00 cm x 4.00 cm (UxY)
EcoMote [10,11]	1.30 cm x 1.10 cm x 0.70 cm (batarya dahil) (GxUxY)
Spec [10]	0.005 cm ³
uPart [10]	0.005 cm ³ (batarya dahil değil)
ZN1 [10]	1.5 cm x 1.5 cm (UxY)
SAND [10]	1.5cm ³
stack and bandaid [10]	25µm x 1.20 cm x 3.50 cm (GxUxY)
DSYS25	0.50 cm x 0.50 cm x 0.50 cm (GxUxY)
Nanodüğüm [12]	1 µm x 2 µm x 6 µm (GxUxY) (ortalama 10-100 µm ³)



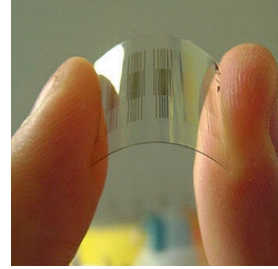
a)TelosB (TelosB)[2]



b) Eco düğüm (Eco node)[10]



c)Mikro düğüm (Micro node)[13]



c)Nano düğüm (Nano node)[12]

Şekil 1.Farklı boyutta telsiz duyurga ağları(Different size wireless sensor nodes)

2. NANO DÜĞÜMÜN BÖLÜMLERİ (NANONODE PARTS)

Nano telsiz duyurga düğümlerinin bölümlerinin, mevcut telsiz duyurga bölümlerinden herhangi bir farkı yoktur. Temel farklılık boyut alanındadır. Nano telsiz duyurga ağlarının, adından da anlaşıldığı gibi nano ölçülere sahip olacak şekilde tasarlanması hedeflenmektedir. Nano telsiz duyurga ağlarının nasıl tasarlanması gerektiği, bölüm bölüm anlatılarak gösterilmektedir [12,14].

2.1. Algılama Ünitesi (Sensing Unit)

Algılama ünitesinde, karbon atomun tek bir katmanından yapılan son derece kuvvetli bir malzeme olan grafen kullanılması hedeflenmektedir. Grafen, rakamsal olarak çelikten yaklaşık 200 kat daha güçlü, bal peteği

şeklinde düzenlenmiş karbon atomlarının tek bir tabakasıdır. Grafenin bu yapısı sayesinde aşırı hızlı transistörler, yarı iletkenler, şeffaf elektrotlar ve algılayıcılar yapılması hedeflenmektedir. Nano düğümlerin bölümlerinin mevcut kablosuz düğümlerin bölümlerinden herhangi bir farkı yoktur. Algılama ünitesinde ise kuvvet, basınç, yer değiştirme gibi fiziksel büyüklükleri; kimyasal bileşimi, moleküler yoğunluğu gibi kimyasal büyüklükleri; antikor / antijen etkileşimi, DNA etkileşimi ve enzimatik etkileşimler gibi biyolojik büyüklükleri ölçebilecek nano algılayıcılar tasarlanması hedeflenmektedir. Bu aşamada ise NTES (NEMS - Nano Teknoloji Elektromekanik Sistemler) [15] sürece yardımcı olacaktır [16]. Nano düğümler, şekil 2 de gösterildiği gibi fiziksel, kimyasal ve biyolojik olmak üzere 3 ana gruba ayrılmaktadır.

Nano Düğüm Çeşitleri



Fiziksel Nano Düğümler:

Kuvvet, basınç, yer değiştirme

Kimyasal Nano Düğümler:

Kimyasal bileşimi, moleküler yoğunluğu

Biyolojik Nano Düğümler:

Antikor / antijen etkileşimi, DNA etkileşimi,enzimatik etkileşimler

Şekil 2. Nano Düğümlerin Çeşitleri (Varieties of nano nodes)

Karbonnanotüpler (KNT) nano telsiz duyurga ağların da algılama ünitesinin geliştirilmesi için uygulanan başka bir alternatif teknolojidir. KNT'lerin başlıca özellikleri küçük boyutta olmaları, hassas olarak hızlı yanıt verebilmeleri, oda sıcaklığında ideal çalışmalarıdır. Bu temel özellikleri KNT'lerin gaz molekül algılayıcı olarak kullanılmasını sağlar. Ayrıca KNT'ler elektrokimyasal reaksiyonlarda elektrot olarak kullanıldığında hatırlama yeteneği ve elektron geçişini artırması sayesinde algılama ünitesi tasarımında kullanılması daha avantajlıdır. KNT'ler yapı itibariyle nano boyuttaki malzeme ve tepkimeleri hissetmektedir. Özellikle, yarı iletken tek duvarlı KNT'lerin çevresindeki değişimlere karşı ileri düzeyde hassas olduğu gözlemlenmektedir. Kısacası KNT'ler mevcut algılayıcılardan 3 kat daha hassastır. KNT'lerin bu yapısı sayesinde, mevcut cihazlardan daha küçük boyutta, çok daha hassas, oda sıcaklığında daha iyi tepkime veren ve daha fonksiyonel cihazların yapılmasına olanak sağlayacaktır [17].

KNT'leri, biyosensör olarak tasarlamak üzere çalışmalara başlayan ilk kişi Dr. Meyyappan dır. Dr. Meyyappan çalışmasında, KNT'lerin mikro boyutta çalışma alanlarında elektrokimyasal sinyalleri algılayarak tepkime vermesini hedeflemiştir. Günümüzde farklı metotlarla üretilen nano sensörlerin, vücut içinde tepkimeleri tanımlamaları ve istenilen cevabı vermeleri mümkündür. Vücut içine yerleştirilmesi hedeflenen nano ölçekli telsiz duyurga ağlarında bulunan nano algılama birimi sayesinde, Glikoz, DNA gibi serum biyomolekülünü tanınması sağlanmaktadır. Vücut içerisindeki hormonlarda değişiklik saptandığında nano algılayıcı hormonun konsantrasyonunu hesaplayarak, gerekirse normal seviyesine dönmesi için ters tepki gösterecek nanoaraçların yapılması mümkündür. Sadece hormonlarda değil aynı zamanda hücre içi ve dışı olayları algılayabilecek, ters giden bir durumda ise enzimatik aktivite, ilaç verme ya da mekanik olarak müdahale edebilme yeteneğine sahip nano makineler konusunda da çalışmalar devam etmektedir [18-20].

2.2. Güç Ünitesi (Power Unit)

Telsiz duyurga düğümünün güç ünitesi için nanometrik ölçülerde olan lityum nanobataryaları düşünülmektedir. Nano bataryaların kapasitesi $45 \mu\text{Ah}^{-1}\text{cm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ 'e kadar çıkmaktadır. Lityum

nanobataryalarının vücut içi haberleşme tercih edildiğinde ise şarj edilmesi zor olmaktadır. Fakat uzaktan şarj imkânlarının da gelişmesiyle farklı uygulamalarda, örneğin doğa takibi gibi tekrar şarjın imkân tanındığı uygulamalarda bu tip bataryalar kullanılabilir. Vücut içi haberleşme de nano düğümlerinin güç ünitesinin oluşturulmasının bir diğer alternatifi ise çinko oksit (ZnO) nano teller kullanılmasıdır. Çinko oksit nano teller, belli bir kuvvet uygulandığında kendi şekline tekrar geri dönme eğilimi gösterirler. Bu sayede oluşturulan titreşimler akım üretir. Cep telefonu teknolojisi ve taşınabilir elektronik cihazlar için hafif ve yüksek enerji kapasiteli bataryalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu alanda ki ihtiyaca cevap vermek için Sol-Jel tekniğiyle nano ölçekli kristaller üzerinde çalışılmaktadır. Metal hidrat ve nikel nano kristaller kullanılarak tasarlanan bataryalar ise bu alanda oluşan açıklığı gidermek için tasarlanan diğer bir çalışma alanıdır [21-23].

2.3. İşlemci Ünitesi (Processing unit)

Nano işlemcilerin üretilmesinin önünü açan ise yine Grafen'dir. Günümüzde kullandığımız silikon işlemciler 9 GHz yanmaya başlarken Grafen ise 500 GHz e kadar ısı sorunu yaşamamaktadır. Günümüzdeki teknolojiye ulaşmayı sağlayan transistörler, yapısına göre aldıkları belirli miktardaki elektrik akımına göre açılıp ya da kapanabilmesi sayesinde günümüzdeki işlemcilerin tasarlanmasına olanak sağlamaktadırlar. Grafen transistörler ise en ufak bir akımda dahi kendileri kapatabilmekte ve bu işlemi bir saniyede binlerce kez yapabilmektedirler. Yapılan testler göstermiştir ki Grafen temelli işlemciler 427 GHz'e kadar çalışabilmektedirler. Bu hız ise kabataslak olarak hesaplanırsa bile, günümüz bilgisayarlarından 100 kat daha hızlı bilgisayarların yapılabileceği anlamına gelmektedir. Ayrıca Prof. Dr. Engin Umut Akkaya yaptığı çalışmalarında moleküllerin matematiksel işlem yapabildiklerini göstermiştir. Profesör bu icadıyla gelecekte mikro ve nano boyutlarda bilgisayar yapımının önünü açmıştır [24,25].

2.4. Hafıza Ünitesi (Storage unit)

Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi Feynman gerçekleşmesi o gün ki şartlara göre zor olan iki proje önerisinde bulunmuş ve sonuca ulaşanlara

ise 1000 dolar ödül vereceğini açıklamıştır. Bu projelerden ilki santimetre boyutlarında üretilmesi istenilen bir motordur. İkincisi ise bir sayfa yazının 25000 kat küçültülerek elektronik mikroskopla okunabilecek boyutlara indirilmesidir. Feynman'ın ilk projesi, sadece birkaç ay sonra Elektrik Mühendisi William McLellan tarafından gerçekleştirilmiştir. McLellan'ın gerçekleştirdiği motorun özellikleri ise 250 mikrogram ağırlığında, 0,3 mm uzunluğunda ve saniyede 33 devir yapabilen küp şeklinde bir motordur. McLellan'a 1000 dolar kazandıran bu motor günümüzde çalışmıyor olsa da Kaliforniya Teknoloji Enstitüsü'nde sergilenmektedir. İkinci proje ise bu kadar erken yapılmamıştır. 25 yıl sonra lisansüstü öğrencisi olan Tom Newman, Charles Dickens'in "İki Şehrin Hikâyesi" romanının ilk sayfasını 25000 kat küçültürken Feynman'a göndermiş ve 1000 doların sahibi olmuştur. Feynman, bu projeleri sayesinde ilk kez nanoteknolojinin adımlarını atmıştır. Nano teknoloji terimini ise ilk kez 1974 yılında Prof. Dr. Norio Taniguchi kullanmıştır. Atomik hafızalar günümüzde de hala çalışma konusudur. CD-ROM ve türevlerinde olduğu gibi bilgi bitlerin olup olmaması 0 ve 1'lerle ifade edilmeye çalışılmaktadır.

IBM laboratuvarlarında atomlar kullanılarak bir film yapılmıştır. Bu film moleküllerin anlık görüntüsü kaydedilerek yapılmıştır. Filmde yaklaşık 5000 atomun hareketleri ile bir hikâye anlatılmıştır. Bu film çekilmesi itibarıyla tek resimli hareket tekniğiyle yapılan dünyanın en küçük filmi unvanını alarak, Guinness Rekorlar Kitabına girmeye hak kazanmıştır. Film boyut olarak açıklanacak olursa; eğer bir atom portakal büyüklüğünde olsaydı, portakal ise dünya büyüklüğünde olurdu. Yani elektronik mikroskopta görülen atomun 100 milyon kez büyültülmüş hali düşünülürse, filmin ne kadar zor çekildiği tahmin edilebilir. Filmde atomları hareket ettirmek için ses kullanılmıştır. Atoma verilen sesin şiddeti, atomun ne hızla ne kadar ilerleyebileceğini hesaplanabilmesine yardımcı olduğu için önemliydi. Bu örnek, atom teknolojisinde bugün nereye kadar geldiğini bildirmektedir. Tekrar Feynman'a dönülecek olursa, Feynman her atomun bir bilgi taşıyabileceğini, bu sayede 5X5X5 atom sayesinde 125 atom bir bite eşitlendiğinde 32 atomla DNA'daki bir bitlik bilgiyi kodlayabileceğini ifade etmiştir [25]. Yoğunluk olarak düşünülürse, karbon bir yapı ele alındığında iki atom arasındaki mesafe 0.142 nm [27] olarak alınırsa depolama

kapasitesi 1 bit/nm³veya 1 gigabit/µm³ den daha büyük olabilecektir.

2.5. Haberleşme Ünitesi (Communication Unit)

Nano düğümlerin haberleşmeleri, moleküler ya da nano-elektromanyetik olarak sağlanacaktır. Haberleşme biriminde grafen temelli antenler yer almaktadır. Karbonun tek atom kalınlığındaki yapısı olarak tanımlanan grafen, olağanüstü mekanik mukavemet, sıra dışı elektronik ve termal iletkenlik, gazlara karşı sızdırmazlık özellikleri ile birlikte diğer fiziksel ve kimyasal özelliklerinin birleşimi sonucu yaygın uygulama alanlarında potansiyel kullanıma sahip ilgi çekici bir malzemedir. Grafenin önemli yapısal özellikleri arasında saflığı, hata yoğunluğu, kalınlığı ve boyutu gelmektedir. Bu üstün özelliklerinden dolayı nano düğümlerden grafen temelli antenler kullanılması hedeflenmektedir. Kablosuz veri aktarımında 20-30 GB gibi büyük verilerin gönderilmesi zahmetli ve uzun olabiliyor. Georgia Teknoloji Üniversitesi Profesörü Ian F. Akyildiz önderliğinde yapılan çalışmalarda grafen temelli antenler sayesinde birkaç metrelik mesafeden 1 terabit/saniye hızında veri aktarımı yapabildiklerini iletmişlerdir. Grafen antenin yapısı ise Akyildiz'in MIT Teknolojisi dergisine verdiği demeçte grafen antenlerin nano yapıda olup 1 mikrometre uzunluğunda ve 10-100 nano metre genişliğinde olacağını, yapısı sayesinde terahertz frekanslarını aktarabileceklerini özetlemektedir [28,29].

3. NANO-HABERLEŞMENİN GÜNÜMÜZ SAĞLIK SEKTÖRÜNE FAYDALAR (NANO-COMMUNICATION BENEFITS TODAY'S HEALTH CARE SYSTEM)

Nano haberleşme son yıllarda adını sıkça duyduğumuz yeni bir haberleşme metodudur. Bu yeni teknoloji sayesinde nano boyutta telsiz duyurğa ağırları üretilerek hücre boyutunda veya yaşayan küçük organizmalar ile etkileşime geçerek yeni teşhis ve tedavi yöntemlerinin gelişmesi sağlamaktadır. Bu telsiz duyurğa ağırları vücutta bulunun zararlı virüs ya da hücrelere yok etmek için istenirse sadece virüs ya da hücrelerin bulunduğu zararlı bölgeye nüfus etmek suretiyle tasarlanabileceklerdir. Nano boyuttaki telsiz duyurğa ağırları sayesinde vücut içindeki değişimler anlık ve hassas bir şekilde takip edilebilecektir. Bir örnek vermek gerekirse kalp krizi geçiren bir hastanın anlık verileri doktora iletilebilecek ve bu

sayede doktorun hastaya daha hızlı müdahale etmesini sağlayacaktır. Nano düğümler vücudun dolaşım sistemine girerek hücre seviyesinde onarım yapıp hastalıkları iyileştirebilecek ayrıca vücut içerisinde dolaşan bu düğümler sayesinde hasatlıkların birçoğu erken teşhis edilebilecektir. Nano boyutlu telsiz duyurga ağırları mikro makasları vasıtası ile bir cerrah gibi hücrelerdeki aksaklıklara müdahale edebilecek, hatta DNA üzerinde değişiklikler bile yapabileceklerdir [30]. Nano boyuttaki telsiz duyurga ağırları sayesinde sadece kanserli dokulara veya civarına kontrollü bir şekilde DNA'yı ve istendiğinde de kemoterapi ajanını da birlikte salabilen nano düğümlerle anti kanser terapileri geliştirilebilecektir. Ayrıca, sinir-nano ağlarının da incelenip elektro-moleküler tasarım prensipleri de ortaya çıkarılarak biyolojik sistemlerden esinlenen nanohaberleşme yöntemlerinin gelişmesine ön ayak olacaktır. Bu sayede vücut içi akıllı ilaç dağıtımı, yan etkisiz kanser tedavisi, hücre düzeyinde sağlık durumu inceleme, yanı sıra halen tedavisi bulunamayan omurilik felci gibi sinir sistemi hastalıkları için nanohaberleşmenin bir umut olduğu söylenebilir [31,32].

Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde gerçekleştirilen bir projede, vücutta kansere yol açabilecek kimyasal değişimleri izleyebilecek çok küçük algılayıcılar geliştirilmiştir. Bu algılayıcılar aynı zamanda kanser ilaçlarının canlı hücreler üzerindeki etkisini de gözlemleyebilmektedir. Massachusetts Teknoloji Enstitüsü'nde Profesör Michael Strano karbon moleküllerinin ince iplikçilerinden yapılan ve DNA ile kaplanabilen algılayıcıların, insan vücudundaki hücrelerden çok daha küçük olduğunu belirtmiştir. Bu algılayıcılar insan dokusu ile aynı tayfta floresan ışığı yayabilmektedirler. Bu sayede algılayıcılar gerekli veriyi almaktadırlar. Işığın şiddeti ise DNA ile etkileşime girdiğinde değişmektedir. Bu sayede araştırmacılar belirli molekülleri tanıyabilmektedirler. Algılayıcıların DNA ile etkileşimde herhangi bir sorun yaşanmaması, bu algılayıcıların vücut içerisinde rahatlıkla kullanılabilmesini göstermektedir [33,34]. Algılayıcıların bahsedildiği özellikleri sayesinde, bu yöntem, insan vücudunun gözlemlenebilmesi için alternatif bir yöntem olabileceğini de göstermektedir [17].

4. SAĞLIK SEKTÖRÜNDE KULLANILMASI HEDEFLENEN HABERLEŞME METOTLARI (COMMUNICATION METHODS THAT PLAN TO USE IN HEALTH CARE SYSTEM)

Sağlık sektöründe kullanılması hedeflenen iki tip haberleşme metodu vardır. Bunlardan ilki yeni bir haberleşme metodu olan moleküler haberleşme diğeri ise günümüzdeki haberleşme metoduna benzeyen elektromanyetik haberleşmedir.

4.1. Moleküler Haberleşme (Molecular Communication)

Moleküler haberleşme nano ölçekli ağlar için umut verici bir iletişim metodudur. Bir kimyasal tepkimeyi ya da koku, ışık, tat gibi değişimleri nano düğümler sayesinde nano ağ kullanarak birbirleriyle haberleşmesini öngören haberleşme çeşididir. Moleküler haberleşmede, klasik haberleşmede olduğu gibi alıcı, verici ve ortamdan oluşmaktadır. Moleküler haberleşmede alıcı; alıcı nano makine, verici; verici nano makine olarak adlandırılırsa; ortam ise moleküllerden oluşan difüzyon kanalına benzetebilir. Moleküler ve nano makineler arasındaki iletişim, biyolojide kullanılan ligand-alıcı yapışma fenomenine benzetebilir. Bu fenomen açıklanacak olursa, insanın endokrin sistemi hormonlar ve hormonları üreten salgı bezlerinden oluşmaktadır. Vücudun dolaşım, sindirim, boşaltım, solunum ve iskelet sistemi endokrin sistemindeki hormonlar vasıtası ile haberleşir. Bu haberleşme oldukça yavaştır. Endokrin sistemdeki hormonlar sayesinde büyüme hızı gibi birçok değişiklik buradan kontrol edilir [35,36]. Endokrin sisteminde kullanılan haberleşme metodu oldukça yavaştır. Hormonlar salgı bezleri tarafından üretilerek kana verilir. İlgili hormon hedef birime ulaştığında, hedef birimi başka bir hormon salgılatarak kendisini tetikleyen hormonun azalmasını sağlar. Bu sayede vücut bir denge içerisinde çalışmaya devam eder [37].

Moleküler haberleşmenin, mevcut nanomakineler düşünüldüğünde yapabilecekleri sınırlıdır. Nanomakinelerin iletişim mesafeleri ve çalışmaları ortamın dielektrik özelliklerinden, yoğunluğuna, su karışımı gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Bu açıdan, nano-makinelerin birbirleriyle haberleşebilmeleri için yeni teori ve

tekniklere gereksinim duyulmaktadır. Moleküler haberleşmede ayrıca haberleşme kanalı değişken sinyal/gürültü oranına sahiptir. Moleküler

haberleşmenin diğer kablosuz haberleşme metotları ile karşılaştırılması Tablo 2 de verilmiştir.

Tablo 2. Moleküler haberleşmenin diğer kablosuz haberleşme metotları ile karşılaştırılması (Comparing molecular communication method for other wireless communication network methods)

	Moleküler Haberleşme	Elektromanyetik Haberleşme	Manyetik İndüksiyon	Optik Haberleşme	Akustik Haberleşme
Bilgi Taşıyıcı	Molekül	Elektromanyetik dalga	Elektromanyetik dalga	Fiber optik	Ortam
Sinyal Çeşidi	Kimyasal sinyal	Elektronik sinyal	Elektronik sinyal	Optik sinyal	Ses sinyali
Yayılma Hızı	Aşırı derecede düşük	Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)	Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)	Işık hızı ($3 \cdot 10^8$ m/s)	Ses hızı
Yayılma Ortamı	Sulu ortam	Hava, toprak, su	Genellikle toprak	Hava, su	Genellikle su

4.2. Elektromanyetik Haberleşme (Electromagnetic Communication)

Elektromanyetik haberleşme günümüzde olduğu gibi gelecekte de kullanılacaktır. Özellikle vücut içi haberleşmesinde, moleküler haberleşmeye bir alternatif olarak gelişeceği düşünülmektedir. Gelişen yüksek frekansları işleyebilen teknolojileri ve anten boyutlarının grafen, KNT'leri gibi materyallerle küçültülmesi nano boyutlarda nano düğümlerin yapılmasına olanak sağlayacaktır. Nano düğümlerin bileşenleri bölüm 2'de ayrıntılı olarak verilmiştir. Fakat Elektromanyetik haberleşmenin de üstesinden gelmesi gereken birçok problem vardır. Dar ve küçük alanları oluşturan moleküllerin dielektrik özellikleri elektromanyetik haberleşmede önemlilik arz etmektedir. Belli frekans aralıklarında iletişim mesafesi artarken belli frekanslarda ise iletişim mesafesi ani bir düşüş gösterebilir. Bu yüzden ortamı oluşturan moleküllerin yapısı detaylı bir şekilde analiz edip modellenmeli, uygun bant geçişleri bulunarak en uzun iletişim mesafesine ulaşılmalıdır. Elektromanyetik haberleşme sadece ortamın dielektrik özelliklerinden değil aynı zamanda sinyal/gürültü oranı, alıcı ve vericinin gücü, boş uzay kaybı gibi mevcut elektromanyetik haberleşmeyi etkileyen etmenlerden de etkilenecektir. Bu bileşenlerde mevcut vücut içi ağı oluşturulurken hesaplanmalıdır [12].

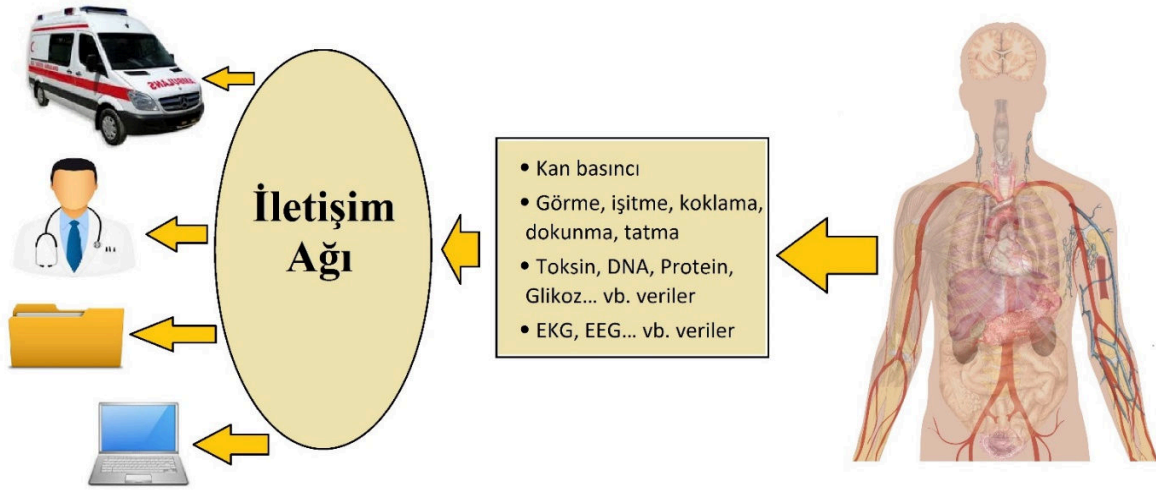
5. NESNELERİN İNTERNETİ (INTERNET OF THINGS)

Gelecekte, geliştirilen LTE (Long-Term Evolution, Uzun Süreçli Evrim) [38], M2M (Machine-to-machine, Makineler arası iletişim) [39] gibi projeler sayesinde günümüzde kullanılan çoğu cihaz bir IP (Internet Protocol Address, İnternet Protokol Adresi) olarak internete girebilecektir. Bu gelişim günlük hayata birçok yenilik getirecektir. Bütün bu gelişmeler, yeni bir teknoloji olan "Nesnelerin İnterneti (Nİ, Internet of Things-IoT)" kavramını dile getirmektedir. Nİ kısaca tanımlanacak olursa, akıllı cihazların birbirleriyle çeşitli haberleşme protokolleri vasıtasıyla haberleşerek akıllı bir ağ oluşturmuş cihazlar kümesini temsil etmesidir. Günlük hayatta kullanılan buzdolabından televizyona, çamaşır makinesinden kombiye kadar her nesnenin internete bağlı bir IP adresine sahip olup, sürekli haberleşebildikleri düşünülebilir [40, 41]. Nİ teknolojisi ilk kez 1999 yılında Kevin Ashton tarafından ortaya atılmıştır ve RFID (Radio Frequency Identification (RFID), Radyo Frekanslı Tanımla) üzerinden birbirleri ile haberleşen cihazları kapsadığı belirtilmiştir, fakat şimdilerde bu kavram Nİ olarak daha geniş ve kapsamlı bir alana dönüşmüştür [42]. 2008 yılında IP adresi almış cihaz sayısının, o yıl ki dünya nüfusundan daha fazla olduğu belirtilmiştir. 2020 yılında ise bu rakamın 50 milyar seviyesine çıkması

beklenmektedir. Bu kadar cihaza IP verebilmenin imkânı ise, 128 bitlik adres uzunluğuna sahip IPv6 (Internet Protocol Version 6, Internet Protokol sürüm 6) protokolü sayesinde sağlanabilecektir.

Nİ interneti, sadece evlerdeki akıllı cihazların birbirleri ile haberleşmesi mantığıyla düşünmek alanı daraltmak olur. Nİ sadece evlerde değil birçok sektörde de yenilik getirecektir. Bunların en başında sağlık sektörü gelmektedir. Nİ sayesinde kronik rahatsızlığı bulunan hastaların durumu anlık olarak izlenebilecek bu sayede hastanın durumu yine anlık olarak doktoruna ya da yakınlarına iletilebilecektir [43]. Acil bir durumda doktoruna ya da yakınlarına sistem ulaşmasa bile, sistem ilk yardım ekibini çağırıp, hastanın anlık kan değerlerini ya da doktor için ihtiyaç olan değişkenlerini daha hasta hastaneye ulaşmadan gönderilmesini sağlayacaktır. Bu sayede hastaya daha hızlı bir şekilde müdahale edilerek, daha iyi

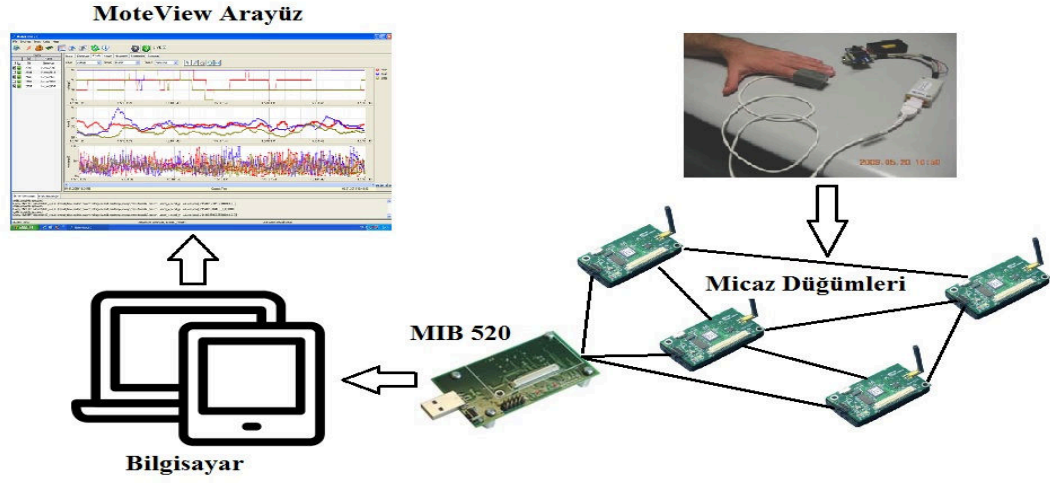
bir sonuç alınması sağlanacaktır. Başka bir örnek verilecek olursa, hastanın kan değerlerine ve kalbin çalışmasına göre kalp krizi geçirme ihtimali artan bir hasta önceden tespit edilebilecektir. Eğer hasta kalp krizi geçiriyor ise kan değerleri anlık olarak hasta, hastaneye getirilmeden önce hastaneye ulaşmış olacaktır. Bu sayede hasta hastaneye gelmeden önce gerekli ilk yardım tedbirleri alınmış ve ilaçları hazırlanmış olacak ve hastanın kaybedilme olasılığı düşürülecektir. İnternet ağı gibi birbirine bağlı olan vücut organları arasındaki koordinasyondan Nİ ve nano haberleşme teknolojileri birleşerek bu koordinasyondan insanlığın anlık olarak bilgilendirilmesi sağlanacaktır. Eğer koordinasyonda yanlış giden bir durum var ise bu durum doktora anlık olarak iletilebilecektir. Bu bahsedilen uygulamaların bir kısmı günlük hayata geçmiş ve birçoğu da yakın bir zamanda günlük hayata geçecektir.



Şekil 3. Nİ teknolojinin biyomedikalde kullanımı (Using IoT in biomedical)

Nİ'nin sağlık sektöründeki en büyük bileşeni ise Kablosuz Vücut Alan Ağları (KVAA)'dır. KVAA'lar kablosuz olarak haberleşebilen vücut içine yerleştirilen çok küçük akıllı cihazlardan meydana gelmektedir. Günlük yaşamda bu teknolojiye yakın uygulamalara örnek verilecek olursa, tablet şeklinde yutulan ve içorganları gösteren kameralar, giyilebilir EKG/EMG/EEG/SpO₂, kanbasıncı, adım ve sıcaklık ölçerlerdir [44]. Nİ sadece hastanın anlık olarak takibini değil aynı zamanda günlük verilerinin depolanarak detaylı bir şekilde analiz edilmesini sağlar. Biriktirilmiş veriler sayesinde daha net ve kalıcı tedavi yapılabilmesinin önünü açmaktadır. Şimdilerde bu tarz uygulamalar Zigbee tabanlı telsiz duyurğa ağları kullanılarak

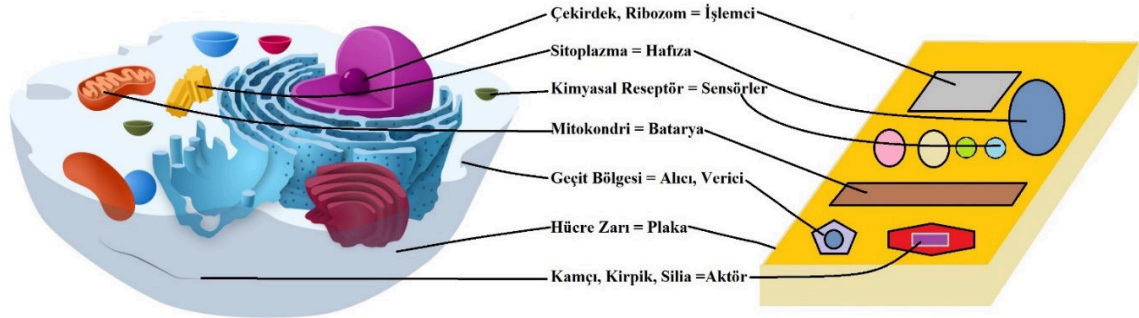
gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır [45]. Bu uygulamaya benzer bir çalışma ise Ege Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliğinde pulse oksimetre cihazını şekil 4'te görüldüğü gibi Micas telsiz duyurğa düğümüne bağlayarak, hastanın kan basıncı, nabız ve oksijen gibi değerlerinin anlık olarak ana monitöre gönderilmesi sağlanmıştır. Türkiye de gerçekleştirilen bu uygulama sayesinde, hastanın kanının anlık değerleri bir ekranda gözlemlenebilmekte ve istenirse sistem verileri sağlık personelinin cihazına gönderebilmektedir [46]. Bu uygulama nano düğümler ve Nİ teknolojilerin birleşimi sayesinde daha verimli, hızlı kullanılabilir ve daha uzak mesafelere veri gönderebilme olanağı sağlayacaktır.



Şekil 4. Micaz düğümleri ile anlık hasta takip sistemi (Instant patient monitoring system with Micaz motes)

Çalışmanın [46] adımları şekil 4’de verilmiştir. Bu çalışmada duyurğa ağlarının biyomedikal bir uygulaması gerçekleştirilmiş ve geliştirilen sistem Ege Üniversitesi Hastanesi’nde denenmiştir. Kablosuz düğümler nesC programla diliyle programlanmış, pulse oksimetre cihazı Micaz düğümlerine bağlanarak hastanın nabız, pletismogram ve kandaki oksijen oranı verileri ZigBee standardı kullanılarak, kablosuz ağ üzerinden merkezi veri tabanına aktarılmıştır. Sistemin performansı, değişik ağ topolojilerinde, paket kaybı yüzdesi olarak ölçülmüştür.

Günümüzde bu sistem oldukça yaygınlaşmaktadır. Moleküler Haberleşme ve Nİ’i teknolojileri sayesinde bu proje daha da geliştirilebilir. Şekilde görülen pulse oksimetre cihazı ve Micaz düğümünün görevini, nano düğümlerin yapması hedeflenmektedir. Ayrıca Nİ sayesinde bu veriler uygulamada olduğu gibi sadece bilgisayar vasıtası ile MoteView ara yüzünden değil aynı zamanda farklı yerlerdeki farklı kullanıcılar için de ulaşılabilirliğinin sağlanması hedeflenmektedir.



Şekil 5. Nİ teknolojisinde kullanılması hedeflenen düğümlerin hücre ile benzetimi (Elements of a biological cell and components of a typical IoT device)

Şekil 5, Nİ teknolojisinde kullanılması hedeflenen düğümlerin hücre ile benzetimini göstermektedir. Bu şekilde görüldüğü gibi düğümün, bir hücreyi oluşturan temel birimlerin çoğuna sahip olacak şekilde tasarlanması hedeflenmektedir. Bu birimlerin oluşturulmasında, nano düğümlerin birimlerinin oluşturulmasında anlatılan metotlardan faydalanılacaktır. Bu düğümlerde istenirse de vücut içinde aktör düğümler sayesinde mikro makasları vasıtası ile bir cerrah gibi hücrelerdeki aksaklıklara müdahale edilebilecek, hatta DNA üzerinde değişiklikler bile yapabilecektir. Anne karnındaki bebeğe bile

gerekli durumlarda neştersiz müdahale etmeyi sağlayacaktır [47].

5.1. Nesnelerin İnterneti Haberleşme Metotları (Internet of Things Communication Methods)

Nİ haberleşme metodu vücut içi haberleşmede bio-Nİ haberleşme metodu olarak adlandırılmaktadır. Temel olarak bio-Nİ haberleşme metodu moleküler haberleşme metodunun türevleriyle benzerdir. Veri, vücut içinden aşağıdaki verilen haberleşme adımlarından biriyle elde edilir ve sağlık birimine iletilir. Fakat bu haberleşme metotlarında da çözülmesi gereken çeşitli

problemler vardır. Örneğin moleküler sinyaller elektromanyetik sinyaller gibi yönünü tayin edemez. Moleküler haberleşmede bir nevi sinyal iletişimi rasgele olur. Bu yüzden yeni veri iletme

ve ortak kanalı kullanma gibi yeni metotlar geliştirilmelidir. Moleküler haberleşmede bir çözüm önerisi bakterilerde olduğu gibi kanal modelleme, analiz etme ve tekrar kullanmadır.



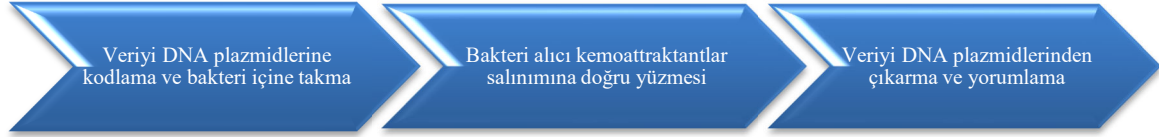
Klasik Haberleşme Adımları



Moleküler Haberleşme-1: Çok kısa Ca^{2+} Haberleşmesi



Moleküler Haberleşme-2: Çok Kısa Mesafe Moleküler Motor Haberleşmesi



Moleküler Haberleşme-3: Orta menzilli - bakteriyel kemotaksi ve konjugasyon

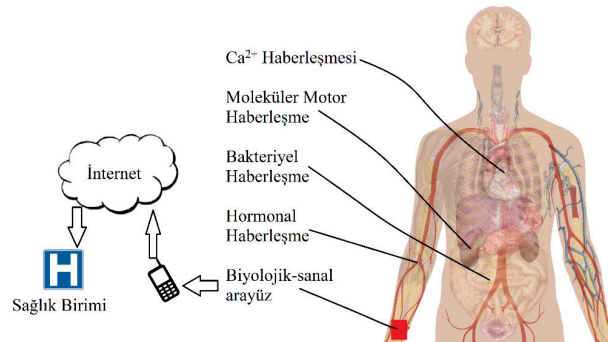


Moleküler Haberleşme-4: Uzun Mesafe Hormonal Haberleşme

Şekil 6. Bio-Nİ haberleşme metotları (Bio-IoT communication methods)

Yukarıdaki şekil, klasik haberleşme adımlarının, bio-Nİ haberleşme metotlarıyla karşılaştırılmasını göstermektedir. Moleküler haberleşme adımları temel olarak klasik haberleşme adımıyla benzerlik gösterir. Moleküler haberleşmede, haberleşme menziline göre haberleşme metodu farklılık

göstermektedir. Kısa mesafelerde taşıyıcı olarak Ca^{2+} veya moleküllerle sağlanırken, orta menzilli haberleşmede bakteriler taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. Vücut içi uzun menzilli haberleşmelerde ise hormonların taşıyıcı olarak kullanılması hedeflenmektedir [48,49].



Şekil 7. Bio-Nİ haberleşme ağ mimarisi (Bio-IoT communication network architecture)

Moleküler haberleşmenin elde etmek istediği verileri, insan vücudu kendi sistemleri vasıtası ile algılayabilmektedir. Moleküler haberleşmenin amacı vücudun kendi sistemine adapte olarak sıra dışı durumlarda sağlık birimini bilgilendirmektir. İnsan vücudunda, haberci moleküller, birincil ve ikincil haberciler olmak üzere iki gruba ayrılabilir. Birincil haberciler hormonlar, büyüme faktörleri gibi hücreler arası iletişimi sağlayan haberci moleküllerdir. İkincil haberciler ise hücre içi haberleşme ile ilgilenir. Birincil habercilerle ikincil haberciler organize şekilde çalışır. Oldukça karmaşık olan bu haberleşmenin hızı hücrelerin birbirlerine yakınlığına göre değişir. Sinir hücrelerinde ise durum biraz daha farklıdır, hücreler birbirlerinden çok uzak olsa bile gövdeden çıkan uzantılar sayesinde hücreler arası temas çok daha hızlı gerçekleşmektedir [50-52].

Bio-Nİ haberleşmesinde kat edilmesi gereken çok mesafe vardır fakat bu mesafelerin hiç biri imkânsız değildir. Tıpkı 90'lı yıllarda cep telefonları ilk çıktığında, gün gelecek bu küçük aletlerle görüntülü görüşebileceği, internete girebileceği gerçeği 10 yıl gibi kısa bir sürede gerçekleştirildiği gibi, bio-Nİ haberleşmesinde de 10 yıl sonraya kadar birçok mesafe aşılmış olacaktır. Fakat bunları aşarken de yeni problemleri de beraberinde getirebilir. Örneğin insan vücudunun bu kadar yakın bir şekilde takip edilmesi, insanlığı biyolojik savaşlara ve terörist saldırılara maruz bırakabilir. Bu yüzden güvenlik tedbirleri de düşünmeli ve yeni standartlar geliştirilmelidir. Yeni virüsler ortaya çıkma ihtimaline karşı tedbirler alınmalıdır. Bu tarz güvenlik önlemleri ise günümüz internet teknolojisindeki güvenlik önlemleri geliştirilerek alınabilir.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu makalede haberleşme teknolojisinin gelecekte sağlık sektörüne nasıl bir katkı sağlayacağı anlatılmıştır. Vücut içi haberleşmenin metotlarından bahsedilmiş, özellikle moleküler haberleşme ve bunun türevleri hakkında bilgi verilmiştir. Moleküler haberleşmenin de bir uzantısı olan bio-Nİ haberleşme metotları hakkında bilgi verilmiş ve bu teknolojilerde kullanılabilecek düğüm prototipleri hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Nano makinelerin, nano ağların, nano düğümlerin ve nano algılayıcıların gelişmesi sayesinde bu makalede anlatılan metotların gelişmesi çok uzak değildir. Prof. Dr.

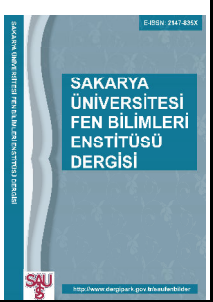
Ian F. Akyildiz önderliğinde Georgia Teknoloji Enstitüsünde, Geniş Bant Haberleşme Laboratuvarında, bahsedilen teknolojilerin gelişmesi için bütçesi 3 milyon dolara yakın projeler yapılmaktadır. Türkiye de ise Prof. Dr. Özgür Barış Akan önderliğinde yapılan "Minerva" isimli çalışma ile biyolojik kökenli nanoağlar ve bilişim esinli nörolojik tedavi için sinir sisteminin haberleşme temellerinin incelenmesini hedefleyen 1,8 milyon avroluk Avrupa Araştırma Konseyi'nin (European Research Council - ERC) projesine imza atılmıştır. Bu nedenle bu makalenin günümüzde ve gelecekte önemli bir araştırma konusunda bilgi vererek, bu alanda çalışmak isteyen araştırmacılara Türkçe bir yol gösterici niteliği taşıyacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Feynman, R. P. . "There's plenty of room at the bottom," *Engineering and science*, 23(5), 22-36,1960.
- [2] Memsic Telos B node, <http://www.memsic.com>
- [3] Tmote Sky node, <http://www.eecs.harvard.edu>
- [4] MICA2, <http://www.eol.ucar.edu>
- [5] Crossbow Imote2 node, <http://www.xbow.com>.
- [6] SHIMMER, <http://www.shimmersensing.com>
- [7] Sun Microsystems Sun SPOT, <http://www.oracle.com/technetwork/>
- [8] Monnit Wireless Sensors, <http://www.monnit.com>
- [9] LORD MicroStrain's Wireless Sensor Networks, <http://www.microstrain.com>
- [10] Ecomote, <http://www.ecomote.net>
- [11] Park, C., Liu, J. ve Chou, P. H. . "Eco: an ultra-compact low-power wireless sensor node for real-time motion monitoring," In *Proceedings of the 4th international symposium on Information processing in sensor networks* (p. 54),2005, April.
- [12] Akyildiz, I. F. ve Jornet, J. M. "Electromagnetic wireless nanosensor networks," *Nano Communication Networks*, 1(1), 3-19, 2010.
- [13] Ceylan, H., Külah, H., Alp D, A., Haşçelik, G. ve Özgen, C. "MEMS Tabanlı Elektrokimyasal Biyosensör Tasarımı ve Üretimi," *Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT)*, 1-5, 2010.

- [14] Jornet, J. M. ve Akyildiz, I. F. "Channel modeling and capacity analysis for electromagnetic wireless nanonetworks in the terahertz band," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10(10), 3211-3221, 2011.
- [15] Erkoç, Ş. "Nanobilim ve nanoteknoloji," ODTÜ yayıncılık, 2007.
- [16] Dragoman, M., Muller, A. A., Dragoman, D., Coccetti, F. ve Plana, R. "Terahertz antenna based on graphene," *Journal of Applied Physics*, 107(10), 104313, 2010.
- [17] Onur, A. R. I., GÖRGÜN, A. R., Adnan, K. A. Y. A., ÇOŞKUN, Ö. ve İrfan, K. A. Y. A. . "Karbon Nanotüp Malzeme İle Tasarlanan Heliks Antenlerin Performans Parametrelerinin İncelenmesi," *SDU Teknik Bilimler Dergisi*, 2(2), 2012.
- [18] Li, J., Lu, Y., Ye, Q., Cinke, M., Han, J. ve Meyyappan, M. . "Carbon nanotube sensors for gas and organic vapor detection," *Nano letters*, 3(7), 929-933, 2003.
- [19] Meyyappan, M. (Ed.). *Carbon nanotubes: science and applications*. CRC press, 2004.
- [20] Kocafe, Ç. "Nanotıp: Yaşam Bilimlerinde Nanoteknoloji Uygulamaları," *Hacettepe Dergisi*, 38, 33-38., 2007.
- [21] Poizot, P. L. S. G., Laruelle, S., Grugeon, S., Dupont, L. ve Tarascon, J. M. "Nano-sized transition-metal oxides as negative-electrode materials for lithium-ion batteries," *Nature*, 407(6803), 496-499, 2000.
- [22] Li, H., Huang, X., Chen, L., Wu, Z. ve Liang, Y. "A high capacity nano Si composite anode material for lithium rechargeable batteries," *Electrochemical and Solid-State Letters*, 2(11), 547-549, 1999.
- [23] Kayır, Y. Z. ve Baççıl, E. G. "Nanoteknoloji Nedir." *KOSGEB Sincan İşletme Geliştirme Merkezi*, 1-6, 2010.
- [24] Wirthlin, M. J., Hutchings, B. L. ve Gilson, K. L. "The nano processor: a low resource reconfigurable processor.," In *FPGAs for Custom Computing Machines, 1994. Proceedings. IEEE Workshop on* (pp. 23-30). IEEE, 1994, April.
- [25] Coskun, A. ve Akkaya, E. U. "Signal ratio amplification via modulation of resonance energy transfer: proof of principle in an emission ratiometric Hg (II) sensor.," *Journal of the American Chemical Society*, 128(45), 14474-14475, 2006.
- [26] Bennewitz, R., Crain, J. N., Kirakosian, A., Lin, J. L., McChesney, J. L., Petrovykh, D. Y. ve Himpsel, F. J. "Atomic scale memory at a silicon surface," *Nanotechnology*, 13(4), 499, 2002.
- [27] Avouris, P. "Carbon nanotube electronics and photonics," *Physics Today*, 62(1), 34-40, 2009.
- [28] Akyildiz, I. F., Brunetti, F. ve Blázquez, C. "Nanonetworks: A new communication paradigm," *Computer Networks*, 52(12), 2260-2279, 2008.
- [29] Akyildiz, I. F. ve Jornet, J. M. . "The internet of nano-things," *IEEE Wireless Communications*, 17(6), 2010.
- [30] Akyildiz, I. F., Jornet, J. M. ve Pierobon, M. "Nanonetworks: A new frontier in communications," *Communications of the ACM*, 54(11), 84-89, 2011.
- [31] Gregori, M. ve Akyildiz, I. F. "A new nanonetwork architecture using flagellated bacteria and catalytic nanomotors," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 28(4), 2010.
- [32] Ezziane, Z. "DNA computing: applications and challenges," *Nanotechnology*, 17(2), R27, 2005.
- [33] Gai, P. L., Stephan, O., McGuire, K., Rao, A. M., Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. ve Colliex, C. "Structural systematics in boron-doped single wall carbon nanotubes," *Journal of Materials Chemistry*, 14(4), 669-675, 2004.
- [34] Cheng, H. M., Li, F., Su, G., Pan, H. Y., He, L. L., Sun, X. ve Dresselhaus, M. S. "Large-scale and low-cost synthesis of single-walled carbon nanotubes by the catalytic pyrolysis of hydrocarbons.," *Applied Physics Letters*, 72(25), 3282-3284, 1998.
- [35] Dixon, R. A. ve Lamb, C. J. "Molecular communication in interactions between plants and microbial pathogens.," *Annual review of plant biology*, 41(1), 339-367, 1990.
- [36] Hiyama, S., Moritani, Y., Suda, T., Egashira, R., Enomoto, A., Moore, M. ve Nakano, T. "Molecular communication," *Journal-Institute of Electronics Information and*

- Communication Engineers*, 89(2), 162, 2006.
- [37] Atakan, B. "Moleküler Haberleşme ve Nanoağlar," emo.org.tr
- [38] Sesia, S., Baker, M. ve Toufik, I. "LTE-the UMTS long term evolution: from theory to practice," *John Wiley & Sons*, 2011.
- [39] Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S. ve Palaniswami, M. "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future generation computer systems*, 29(7), 1645-1660, 2013.
- [40] Atzori, L., Iera, A. ve Morabito, G. "The internet of things: A survey," *Computer networks*, 54(15), 2787-2805, 2010.
- [41] Welbourne, E., Battle, L., Cole, G., Gould, K., Rector, K., Raymer, S. ve Borriello, G. "Building the internet of things using RFID: the RFID ecosystem experience," *IEEE Internet Computing*, 13(3), 2009.
- [42] AKTAŞ, F., ÇEKEN, C. ve ERDEMLİ, Y. E. "Nesnelerin İnterneti Teknolojisinin Biyomedikal Alanındaki Uygulamaları," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(1), 2016.
- [43] Aktaş, F., Çeken, C. ve Erdemli, Y. E. "Transmission of physiological signals with quality of service support by using Wireless Body Area Networks," In *Medical Technologies National Conference (TIPTEKNO)*, 2015 (pp. 1-4). IEEE, 2015.
- [44] Luo, J., Chen, Y., Tang, K. ve Luo, J. "Remote monitoring information system and its applications based on the Internet of Things," In *BioMedical Information Engineering*, 2009. *FBIE 2009. International Conference on Future* (pp. 482-485). IEEE, 2009.
- [45] Sokullu, R., Akkas, M. A. ve Çetin, H. E. "Wireless patient monitoring system," In *Sensor Technologies and Applications (SENSORCOMM)*, 2010 *Fourth International Conference on* (pp. 179-184). IEEE, 2010.
- [46] Akyildiz, I. F., Pierobon, M., Balasubramaniam, S. ve Koucheryavy, Y. "The internet of bio-nano things," *IEEE Communications Magazine*, 53(3), 32-40, 2015.
- [47] Nakano, T., Suda, T., Moore, M., Egashira, R., Enomoto, A. ve Arima, K. "Molecular communication for nanomachines using intercellular calcium signaling," In *Nanotechnology*, 2005. *5th IEEE Conference on*(pp. 478-481). IEEE, 2005.
- [48] Giné, L. P. ve Akyildiz, I. F. "Molecular communication options for long range nanonetworks," *Computer Networks*, 53(16), 2753-2766, 2009.
- [49] Atakan, B. ve Akan, O. B. "An information theoretical approach for molecular communication," In *Bio-Inspired Models of Network, Information and Computing Systems*, 2007. *Bionetics 2007. 2nd* (pp. 33-40). IEEE, 2007.
- [50] Nakano, T., Moore, M. J., Wei, F., Vasilakos, A. V. ve Shuai, J. "Molecular communication and networking: Opportunities and challenges," *IEEE transactions on nanobioscience*, 11(2), 135-148, 2012.
- [51] Çoşkun, A., "Hücrelerarası İletişim ve Haberleşme," *Bilim ve Teknik*, Eylül 2011.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 09.05.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 23.02.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.311289	

Türkiye inşaat sektörünün global karbon ayak izi analizi

Nuri Cihat Onat*¹

ÖZ

Türkiye inşaat sektörünün ekonomik, çevresel, ve sosyal etkilerinin analizi son yıllarda önemini giderek artırmıştır. Özellikle artan inşaat, ulaşım, üretim ve enerji yatırımları Türkiye ve dünya ekonomisine doğrudan ve dolaylı etkiler yapmaktadır. Bu makalede, Türkiye için önemli bir araştırma boşluğunu doldurmak amacıyla Türkiye'deki inşaat sektörünün uluslararası tedarik zincirlerini de kapsayacak bir biçimde ilk, web tabanlı ve küresel karbon ayak izi analizi çıkartılmıştır. Avrupa Komisyonu 7. Çerçeve Araştırma Programınca desteklenen Dünya Girdi-Çıktı Veritabanı'nın 'World Input-Output Database' Türkiye inşaat sektörü için ilk kez kullanılacağı bu çalışmada, Türkiye inşaat sektörünün 2000 ile 2009 yılları arasındaki karbon ayak izi etkileri ulusal ve küresel çapta analiz edilmiştir. Türkiye inşaat sektörlerinin bölgesel ve küresel düzlemde çevresel etkileri hesaplamak ve kapsamlı sürdürülebilirlik analizleri yapılmak için bir model geliştirilmiştir. Önerilen modelin benzer versiyonları Amerika Birleşik Devletleri, Avrupa Birliği, Avustralya, İngiltere ve Japonya gibi birinci dünya ülkelerinde stratejik karar vermede kullanıldığı halde, Türkiye için benzer kapsamlı bir model henüz mevcut değildir. Bu motivasyonla, 'Küresel Karbon Ayak izi Muhasebe Modeli' (Global Carbon Footprint Accounting Tool) geliştirilmiş ve inşaat sektörü için kapsamlı bir analiz yapılmıştır. Harvard'lı ünlü ekonomist Wassily Leontief'in ekonomi alanında Nobel Ödülü kazandığı girdi-çıktı analizinin küresel modele dönüştürülerek kullanılacağı bu çalışma, zaman serisi analizi, kapsam bazlı karbon ayak izi modellemesi, üretim-tüketim odaklı, ve küresel etki dağılımı analizi gibi yenilikçi yöntemlerle kullanıcılara tedarik zinciri odaklı analizler yapma imkanı sağlamaktadır. Analiz sonuçlarına inşaat sektöründeki büyümeden dolayı sektörün karbon ayak izi yıllara göre artış göstermiştir. İnşaat sektörünün Kapsam 2 ve 3 karbon salınımları (dolaylı salınımlar) sektörün toplam emisyonlarının ortalama %80'nine karşılık gelmektedir ve sektörün emisyonlarını düşürmek için tedarik zinciri ile beraber değerlendirilmesi gerekmektedir. Araştırma sonucunda geliştirilen küresel modelin başta bakanlıklar olmak üzere, araştırma enstitüleri ve üniversitelerdeki karar verme süreçlerinde yaygın bir biçimde kullanılabilmesi için web-tabanlı bir şekilde internet ortamında da sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Karbon ayak izi, Türkiye inşaat Sektörü, Global ekonomik girdi-çıktı analizi, Sürdürülebilir Kalkınma

¹ Katar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Katar Ulaştırma ve Trafik Güvenliği Araştırma Merkezi, Doha, Katar – onat@qu.edu.qa

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

Global carbon footprint analysis of Turkish construction industry

ABSTRACT

The analysis of economic, social, and environmental impacts (termed as triple-bottom-line) of Turkish sectors has become a topic of considerable interest. Especially, there are significant regional and global effects of increasing construction, transportation, manufacturing, and energy investments in Turkey. In this study, with the aim of filling an important research gap, Turkish construction sector, including its supply chain, is analyzed using a web-based global carbon footprint analysis for the first time. In this study, using the World Input-Output Database, which is funded by the European Commission under the 7th Research Programme for the Turkish Construction industry for the first time, carbon footprint of the Turkish construction sector is analyzed both at national and global scales in between 2000 and 2009. A comprehensive sustainability analysis of Turkish construction sector has been conducted considering regional and global environmental impacts. Although similar modeling approaches have been used in various developed nations including United States of America, European Union, Australia, Japan, and United Kingdom, for strategic decision making, there is no such holistic sustainability assessment platform for Turkish economy. With this motivation, this study aims to develop a first, web-based global sustainability assessment platform and used for the Turkish construction industry. Using the extended version of Wassily Leontief's (a well-known economist from Harvard University) Nobel awarded input-output analysis as a global multiregional input-output model, the model allows users to conduct novel analyses such as time-series, scope-based carbon footprint, production-consumption based, and global impact distribution analyses. According to analysis results, because carbon emissions due to growth in Turkish construction sector are greater the emission reduction stemming from efficiency increases in between 2000-2009, the total carbon emissions of the sector increased in between these years. Scope 2 and 3 emissions (indirect emissions) of the sector is %80 of the sector's total and the supply chain of the sector needs to be considered to be able to reduce the sector's emissions. The proposed model is disseminated through an online platform to serve in decision-making processes in ministries, research institutes, universities, and non-profit organizations.

Keywords: Carbon Footprint Accounting, Turkish Construction Sector; Global economic input-output analysis; Sustainable Development.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Değişen dünyada 'Sürdürülebilir Kalkınma' ülkeler için bir tercihten ziyade zorunluluk haline gelmiştir. Yapılan kapsamlı literatür taramasında, sürdürülebilir kalkınma çok farklı ifadelerle karşımıza çıksa da en geçerli tanım Çevre ve Kalkınma Dünya Komisyonu'nun (Brundtland Commission) 1987 yılında yayınladığı 'Ortak Geleceğimiz' (Our Common Future) adlı raporda şu şekilde belirtilmiştir: "Sürdürülebilir kalkınma günümüz ihtiyaçlarının gerektirdiği kalkınmanın, gelecek kuşakların gereksinimlerini karşılama kabiliyetlerini ortadan kaldırmayacak şekilde gerçekleşmesidir" [1]. Sürdürülebilir kalkınmaya paralel olarak 'Yeşil Ekonomi' (Green Economy), büyüyen dünya ekonomilerinde önemini gitgide artırmaktadır. Birleşmiş Milletler Çevre Programına göre, yeşil ekonomi çevresel

kirlenmeyi ve ekolojik kirliliği azaltırken ekonomik refahın ve sosyal eşitliğin iyileştirilmesi olarak tarif edilmektedir [2]. En kısa tanımıyla yeşil ekonomi, ekonomik ve çevresel kalkınmanın çevreye duyarlı ve sosyal refahı iyileştirici olmasını öngörmektedir. Bütün bu tanımlar çerçevesinde sürdürülebilir kalkınma; ekonomide istihdamın ve gelirin artmasını, çevre kirliliği ve sera gazlarının azaltılmasını, ekolojik dengenin korunmasını ve enerji ve kaynak verimliliğini zaruri kılmaktadır [3]. Özetle, sürdürülebilir kalkınma ve yeşil ekonomi, ilk defa John Elkington tarafından 1997 yılında ortaya atılan 'Üçlü-kar-hanesi' (triple-bottom-line) yani sürdürülebilir kalkınmanın çevresel, ekonomik ve sosyal boyutlarının aynı anda iyileştirilmesini öngörmektedir [4,5].

İnşaat sektörü Türkiye'deki lokomotif sektörlerden biri olup ekonomik, çevresel, ve

sosyal etkileri kapsamlı olarak değerlendirilmesi elzem olan bir sektördür. Özellikle artan inşaat, ulaşım, üretim ve enerji yatırımları Türkiye ve dünya ekonomisine doğrudan ve dolaylı etkiler yapmaktadır. İnşaat sektörünün gayri safi milli hasıla (GSMH) içerisindeki payı Temmuz 2016 itibari ile %30 olmuştur. İnşaat sektörü kendine bağlı 200’den fazla alt sektörün ürettiği mal ve hizmete talep oluşturmakta olup doğrudan 1,840,000 kişiye istihdam sağlamaktadır [6]. Bütün bu verilere karşın, inşaat sektörünün çevresel etkilerine ilişkin net veri kaynakları olmayıp, sürdürülebilirlik etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda sektörün çevresel etkilerinin daha yoğun olduğu yerler hem tedarik zinciri içerisinde hem de lokasyon olarak tespit edilmeli ve sektörün çevresel, ekonomik, ve sosyal verimliliği artırılmalıdır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Sürdürülebilirlik analizi modelleri arasında ‘Yaşam Döngüsü Analizi’ (Life Cycle Assessment) olarak bilinen model literatürde en yaygın olarak kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir [7]. Yaşam döngüsü analizi bir ürünün temel ham maddesinin kaynağından çıkarılması ve işlenmesi, üretilmesi, depolanması ve nihai tüketiciye ulaştırılması süreçlerindeki çevresel etkilerini hesaplayan bir yöntemdir [8–11]. Son yıllarda bilim çevresinde kullanımı oldukça yaygınlaşan bu konular [12], ticari yapılar [13], gıda ürünleri [14], otomobiller [15–17], enerji sistemleri [18,19], endüstriyel ürünler ve süreçler [20] ve tüketim tipleri [21] için birçok bilimsel çalışmada kullanılmıştır. Buna karşılık sosyal ve ekonomik etkilerinde ölçülebilmesi amacıyla geleneksel yaşam döngüsü analizi, ‘Yaşam Döngüsü Sürdürülebilirlik Analizi’ yöntemine doğru hızlı bir şekilde dönüşüm gerçekleştirmiştir. İlk defa Kloepffer [22] tarafından önerilen bu yenilikçi model ‘çevresel yaşam döngüsü’, ‘sosyal yaşam döngüsü’ ve ‘yaşam döngüsü maliyet analizi’ gibi yöntemleri kullanarak sürdürülebilir kalkınmanın üç boyutunu da aynı anda yaşam döngüsü analizi yöntemine entegre etmiştir [5,23–26]. Fakat, yukarıda bahsedilen yöntemler ürün bazında detaylı sürdürülebilirlik analizi yapma imkanı verse de, temel anlamda proses düzeyinde doğrudan etkilere yoğunlaşarak tedarik zinciri bazlı dolaylı etkileri kapsamamakta ve sektörlerin ekolojiye, ekonomiye ve topluma vermiş oldukları

dolaylı etkileri hesaba katmamaktadır [27]. Bu nedenle proses bazlı yaşam döngüsü modellerinin kullanıldığı çalışmalarda toplam etkinin yüzde 50’si ve daha fazlası bazen hesaplanamamaktadır [28–30].

Bu bağlamda ekonomi alanında ‘Nobel Ödülü’ kazanmış Wassily Leontief tarafından geliştirilen Ekonomik Girdi-Çıktı Analizi ilk kez Carnegie Mellon Üniversitesi Yeşil Dizayn Enstitüsü tarafından Amerika’daki sektörlerin sürdürülebilirlik analizi için kullanılmıştır [31]. Genel olarak ekonomik girdi-çıktı analizi ekonomiyi oluşturan sektörler arasındaki parasal akışı kullanarak sektörlerin doğrudan ve tedarik zincirlerindeki ekonomik aktivitelere bağlı dolaylı etkilerini hesaplamaktadır [32,33]. ‘Ekonomik Girdi-Çıktı Yaşam Döngüsü Analizi Modeli’ (Economic Input-Output Life Cycle Assessment EIO-LCA) olarak isimlendirilen bu metod ilk kez 90’lı yılların sonunda geliştirilmiş ve Amerikan Ulusal Bilim Vakfı (US National Science Foundation) tarafından 5 yıl boyunca 2 milyon dolarlık bir bütçeyle fonlanmıştır [34]. Bugüne kadar dünyada bir milyonun üzerinde araştırmacının kullandığı bu program, www.eiolca.net sitesinde kullanıcılara ücretsiz olarak sunulmuştur [35]. Bu modeli kullanan çalışmalar arasında yapı sektörleri [36,37], enerji kaynakları [38,39], binalar [12,26,40–42], ulaştırma sistemleri [43–50], ve üretim sektörleri [14,51] sadece belli başlı örnekleri oluşturmaktadır. Amerika’da hala birçok bakanlık ve araştırma kuruluşu tarafından stratejik sürdürülebilirlik analizi için kullanılan bu modelin en zayıf yönleri en son 2002 yılına ait verilerle çalışması, tek bölgeli analizler yapabilmesi ve sadece enerji kullanımı, su tüketimi, karbon ayak izi ve atık üretimi gibi belli başlı çevresel etki kategorilerine yoğunlaşmış olmasıdır [52,53].

Daha önce tartışıldığı üzere sürdürülebilir kalkınma sadece çevresel kaynak kullanımının ve kirliliğin azaltılması ile değil ekonomik ve sosyal refahında paralel olarak artırılması ile mümkündür. Bu manada Carnegie Mellon Üniversitesi tarafından geliştirilen model sadece çevresel etkilere odaklandığı için artık yetersiz hale gelmektedir. Bu boşluğu gören bir grup akademisyen ekonomik girdi-çıktı tablolarını sosyo-ekonomik ve çevresel indikatörlerle entegre ederek sektörlerin sürdürülebilirliklerini analiz etmişlerdir [29]. Örneğin, Foran vd. [54] ilk defa ‘Balancing Act’ adlı çalışmasında 135 Avusturalya sektörünü toplamda 10 farklı

çevresel, ekonomik ve sosyal indikatör kullanarak değerlendirmiştir. Bu kapsamlı çalışma ile birlikte Sidney Üniversitesi'nde kurulmuş olan 'Entegre Sürdürülebilirlik Analizi (Integrated Sustainability Assessment) araştırma grubu BottomLine programını geliştirerek Avusturalya sektörlerinin sürdürülebilirlik analizi modelini kurmuş ve her bir sektörü tedarik zincirlerinde oluşan etkileri de kapsayacak biçimde analiz etmiştir. Benzer modelin 2006 yılında Japonya Araştırma Enstitüsü ve Bilimler Akademisi desteği ile Japonya versiyonu geliştirilerek BottomLine³ Japon kullanıcılara sunulmuştur [55]. Ayrıca İngiltere'deki araştırmacılarda 72 sektörden oluşan İngiliz ekonomisinin çevresel, ekonomik ve sosyal etkilerini izlemek amacıyla BottomLine³ İngiltere versiyonu geliştirilmiştir [29]. Bu modeller günümüze kadar birçok kamu kuruluşunda, araştırma enstitüsünde ve üniversitede etkin bir biçimde sürdürülebilirlik analizi modeli olarak kullanılmıştır. Bu programı kullanarak araştırmacılar üretim ve servis sektörlerinin [56] , şirketlerin [29], kamu kuruluşlarının [57] ve enerji sistemlerinin [58] analizlerini yapmışlardır.

Avusturalya, İngiltere ve Japonya için geliştirilen ve sürdürülebilir kalkınmanın üç boyutunu hesaba katan bu modellerin sektör ve indikatör bazında daha gelişmiş ve detaylı versiyonu 2012 yılında Dr. Küçükvar tarafından Amerika'nın 428 sektörlü detaylı ekonomisi için geliştirilmiştir [59]. 'Üçlü-Kar-Hanesi Ekonomik Girdi-Çıktı Analizi' (Triple-Bottom-Line Economic Input-Output Analysis) olarak adlandırılan bu model Amerika'nın en kapsamlı endüstriyel sürdürülebilirlik analizi modellerinden biri olmuştur. Amerikan Ulusal Bilim Vakfı (US National Science Foundation) ve Amerikan Ulaştırma Bakanlığı (US Department of Transportation) ile ortak olarak yürütülen projelerde kullanılan bu model ayrıca birçok bilimsel yayında ve lisansüstü öğrenci tezinde kullanılmıştır [46,60,61]. Bazı çalışmalara örnek vermek gerekirse, bu model kullanılarak 2013 yılında Amerika yapı sektörlerinin çevresel, ekolojik, ekonomik ve sosyal etkileri tedarik zincirlerini de kapsayacak şekilde analiz edilmiştir [5,62]. Diğer çalışmalarda çeşitli otoyol dizayn alternatifleri aynı model ile çok kriterli karar destek yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir [30,63]. Amerikan hane halkının, kamu sektörü tüketim ve yatırımlarının, özel sektör yatırımlarının ve ihracatın sosyal, ekonomik ve çevresel etkileri yine bu model ile analiz edilmiştir

[64]. Rüzgar enerjisi santralleri [38], konut ve ticari binalar [12], ulaşım sistemleri [61] ve üretim sektörleri [65], Dr. Küçükvar'ın geliştirmiş olduğu bu modelin Amerika için son yıllarda kullanıldığı belli başlı çalışmaları içermektedir. Bütün bu çalışmaların temel bulguları göstermiştir ki; sürdürülebilirlik analizi daha çok süreç temelli yaşam döngüsü analizi modelleri kullanılarak çevresel etkilere yoğunlaşmış ve sosyo-ekonomik etkiler birçok çalışmada göz ardı edilmiştir. Buna ek olarak, ekonomik girdi-çıkı analizini tedarik zincirlerinde oluşan dolaylı etkileri de kapsadığı için endüstriyel sürdürülebilirlik analizi çalışmalarında kritik bir modelleme tekniği haline gelmiştir [66,67]. Fakat yukarıda gelişmiş ülkeler için örnekleri verilen modellerin benzeri Türkiye için henüz mevcut değildir.

Yukarıda örnekleri verilen tek bölgesel girdi-çıkı modelleri sürdürülebilirlik analizi konusunda geniş çapta kullanılsa da, küresel girdi-çıkı analizi dünya çapında önem kazanmakta ve sürdürülebilir üretim ve tüketim konularında küresel politikalar üretmede tercih edilmektedir. Yayınlanan kapsamlı bir derleme makalesi göstermiştir ki, 2010 yılına kadar girdi-çıkı analizi kullanılarak yapılan sürdürülebilirlik çalışmaları daha çok tek ülke ve yılı baz almıştır [68]. Bu çalışmalar uluslararası ticaret kaynaklı çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri tüm ülkeler için eşit teknoloji varsayımı kullandığından hesaba katmamıştır. Fakat günümüzde ülke ekonomileri açık hale geldiğinden küresel etkilerin hesaplanması zaruri hale gelmektedir [69,70]. Bu noktada çok ülkeli (küresel) girdi-çıkı 'Multi Regional Input-Output (MRIO)' modelleri literatürde çok tartışılmış ve küresel düzlemde sürdürülebilirlik analizi çalışmalarında önemli bir modelleme tekniği haline gelmiştir [71,72]. Bu amaçla çok ülkeli girdi-çıkı veritabanları geliştirilmiş olup ülkelerin tüketim ve üretimini analiz etmek için kullanılmıştır. Bu veri tabaları arasında Global Resource Accounting Model (GRAM), Externality Data and Input-Output Tools for Policy Analysis (EXIOPOL), Global Trade Analysis Project (GTAP), World Input-Output Database (WIOD) ve EoRA en çok bilinen ve kullanılanları temsil etmektedir [73-75]. Bu veri tabanları kullanılarak, hane halkı tüketiminin çevresel etkileri [71], üretim sektörleri [76,77], uluslararası ticaret [72,78,79], ve ülkeler [72,80] analiz edilmiştir. Fakat 2015 öncesine kadar yukarıda bahsedilen uluslararası girdi-çıkı veritabanları Türkiye ekonomisinin sürdürülebilirlik analizi için kullanılmamıştır. İlk

olarak Küçükvar vd. [81] tarafından kullanılan WIOD veritabanı ile Türkiye üretim sektörlerinin kapsam bazlı karbon ayak izi çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada 16 üretim sektörünün ulusal ve küresel ölçekte etkileri zaman serisi analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Yine Küçükvar ve Samadi [82] tarafından kullanılan WIOD veritabanı, 2000 ve 2011 yılları arasında 27 Avrupa Birliği Üye Ülkesini (EU-27) ve Türkiye'yi kapsayacak şekilde gıda ürünleri üretim endüstrilerinin ulusal ve küresel enerji ve karbon ayak izini analiz etmiştir. Fakat bu çalışmalar dışında Türkiye üretim ve servis sektörlerinin küresel ölçekte sürdürülebilirlik analizi çalışılmamış olup, bu veri tabanları Avrupa, Amerika ve Avusturalya'da olduğu gibi stratejik karar verme süreçlerinde kullanılmamıştır.

2.1. Modelin Yenilikçi Yönleri ve Motivasyon (Novel Aspects of The Model and Motivation)

Literatürdeki ihtiyaçlardan ve küresel ihtiyaçlardan yola çıkarak, bu çalışmada web tabanlı global karbon ayakizi programı geliştirilmiş olup, Türkiye İnşaat sektörünün kapsamlı bir karbon ayak izi yapılmıştır. Geliştirilen model Türkiye'de ilk web-tabanlı küresel ölçekte sektör özelinde karbon ayak izi analizi yapabilen tek modeldir. Global Karbon Ayakizi (G-CAT) modeline <https://sustainabilitylab.herokuapp.com/gcat> bağlantısı aracılığı ile ulaşabilirsiniz.

Dünya Kaynakları Enstitüsü (World Resource Institute, WRI) ve İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) tarafından geliştirilen Sera Gazı Protokolü (Greenhouse Gas Protocol), sera gazlarının kapsam bazlı hesaplanmasını öngörmektedir [83,84]. Bu protokole göre sera gazları Kapsam 1, 2 ve 3 olmak üzere üç farklı kategoride incelenmektedir. İşletme sonucu oluşan ve doğrudan atmosfere salınan emisyon kaynakları Kapsam 1 olarak hesaplanmaktadır. Dışardan enerji formunda alınan hammaddelerden ve elektrik kullanımından kaynaklanan emisyonlar Kapsam 2 olarak değerlendirilmektedir. Kapsam 3 emisyonlar ise dışardan tedarik edilen faaliyetlerden ortaya çıkan, kaynağında oluşan ve kontrol etme şansı bulunmayan emisyonlardır. Genel olarak şirketler sera gazı envanter raporunda Kapsam 3'te satın alınan hammaddelerin üretilmesinden, atık bertarafından, personel taşıma servis hizmetlerinden ve iş amaçlı seyahatlerden

kaynaklanan emisyonları hesaplamıştır. Birçok çalışma kapsam bazlı sera gazı emisyonlarını hesaplamak amacıyla ekonomik girdi-çıkı analizini kullanmış ve sektörlerin iklim değişikliğine olan doğrudan ve dolaylı etkilerini analiz etmiştir [12,85,86]. Geliştirilen G-CAT modeli bu protokole uygun olarak kapsam bazlı karbon analizi yapması modelin yenilikçi özellikleri arasındadır. Kapsam bazlı analiz Türkiye İnşaat sektörüne uygulanmış ve karbon hesaplama standartlara uygun bir şekilde analiz edilmiştir.

Son yıllarda sürdürülebilir kalkınmanın devlet politikası haline gelmesiyle birçok bakanlık sürdürülebilir kalkınma hedeflerini açıklamaktadır. Örneğin, T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2015 yılı itibarıyla tüm üretim sektörleri için karbon ayak izi salınımının izlenme ve raporlanmasını zorunlu hale getirmiştir. Amaç, 2015 yılında Fransa'nın Paris şehrinde düzenlenecek olan Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Konferansı (COP21) sonrası Türkiye'nin elinin güçlü hale getirmek ve iklim değişikliği ile mücadelede önemli adımlar atmaktır [87]. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı da endüstriler için enerji verimliliği zorunlu hale getirmiş ve 2023 yılı için 1990 yılı seviyesine kıyasla enerji kullanım miktarında % 20 oranında enerji kullanım miktarında azalma hedeflemiştir [88]. T.C. Kalkınma Bakanlığınca hazırlanan '10. Kalkınma Planında' yerli üretim, enerji, ulaşım ve inşaat yatırımları öne çıkmakta ve bunlara paralel olarak sosyo-ekonomik refahın da artırılması öngörülmektedir [89]. Tüm bu hedeflere ulaşma noktasında Türkiye için ulusal ve küresel çapta sürdürülebilirlik analizi modelinin geliştirilmesi zorunlu hale geldiğinden, bu makalede sunulan model Türkiye için oldukça önemlidir. Ayrıca daha önce benzer amaçları taşıyan ve benzer metotları kullanan çalışmalar yapıp, modeller geliştirilmediği için de oldukça yenilikçi bir model olmuştur. Türkiye'nin lokomotif sektörlerinden olan inşaat sektörünün kapsamlı analizi devlet kuruluşlarındaki karar vericilere ışık tutması beklenmektedir.

Daha önce Avusturalya, İngiltere ve Japonya için geliştirilen ulusal BottomLine modellerinin kullanılması 2014 yılının Aralık ayında Avusturalya'nın Brisbane şehrinde düzenlenen G20 zirvesinde ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedeflerinin değerlendirilmesi için tavsiye edilmiştir [90]. Fakat bu modeller tek yıl ve ülke bazında geliştirilmiş olup limitli sayıda çevresel,

ekonomik ve sosyal indikatör içermektedir. Ayrıca bu modeller, veri madenciliği ve istatistiksel modellerle entegre bir şekilde dizayn edilmemiştir ve Türkiye için henüz bu tür stratejik bir sürdürülebilirlik analizi modeli mevcut değildir. Türkiye için önerilen bu projede, Avrupa Komisyonu destekli Dünya Girdi-Çıktı Veri Tabanı ‘World Input-Output Database’ tarafından oluşturulan, 1995 ile 2011 yıllarını kapsayan küresel ekonomik girdi-çıktı tabloları kullanılacaktır. Sonuçlar *tedarik zinciri katman analizi, kapsam bazlı karbon ayak izi modellemesi, tedarik zinciri etki lokasyon analizi, küresel etki dağılımı analizi* ve *ülke bazlı karşılaştırmalı etki analizi* gibi yöntemler kullanılarak sunulmuştur. Bu şekilde kullanıcılar, sektörlerin etkilerinin lokasyonlarını tespit ederek kritik tedarik zinciri sektörlerini belirleyebilecektir. İnşaat sektörü özelinde tedarik zincirinin hangi noktalarında (servis, üretim, ulaştırma, vb.) ve hangi ülkelerde karbon salınımı neden olduğu model sayesinde kolaylıkla görülebilir ve karbon salınımını azaltmayı hedefleyen stratejilerin verimliliği artırılabilir.

Türkiye’nin ilk, web tabanlı ve küresel sürdürülebilirlik analizi platformunun geliştirileceği proje kapsamında Carnegie Mellon Üniversitesi tarafından Amerikan ekonomisi için geliştirilen ve 2000 yılından bu yana dünyada 1 milyondan fazla kullanıcının giriş yaptığı ‘EIO-LCA’ programının çok daha ileri versiyonunun Türkiye ekonomisi için geliştirilmiş halidir. G-CAT modeli Amerikan modelinden yöntem ve kapsam noktasında önemli farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar **Tablo 1**’de detaylı olarak açıklanmıştır.

Tablo 1: EIO-LCA ve G-CAT Arasındaki Önemli Farklılıklar (Table 1: Important differences in between EIO-LCA and G-CAT models)

Carnegie Mellon Tarafından Geliştirilen EIO-LCA Modeli	G-CAT Modeli
En son 2002 yılına ait verilerle çalışması ve güncel olmaması.	Dünya Girdi-Çıktı Veri tabanını ‘World Input-Output Database’ kullanarak 1995 ile 2011 arasında zaman serileri analizi yapılabilmesi.
Amerikan ekonomisine özel olması ve tek ülkeli sürdürülebilirlik analizi yapılabilmesi.	Türkiye ekonomisinin yanısıra toplamda 40 ülkeyi de kapsayacak şekilde küresel modelleme imkanı vermesi ve dünya ekonomisini kapsaması.
Veri madenciliği tekniklerinin kullanılmaması ve	Veri madenciliği kullanarak; tedarik zinciri katman analizi, kapsam bazlı karbon ayak izi modellemesi, tedarik zinciri etki lokasyon analizi, küresel etki dağılımı analizi ve ülke

tedarik zinciri analizleri içermemesi.	bazlı karşılaştırmalı etki analizi gibi yöntemleri içermesi.
İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği (World Business Council for Sustainable Development) tarafınca sektörler için önerilen Kapsam 1, 2 ve 3 bazlı karbon ayak izi analizi yapmaması.	Sektörlerin karbon ayak izlerinin Kapsam 1, 2 ve 3’e göre hesaplanması.

Türkiye inşaat sektörünün ilk, web tabanlı ve küresel karbon ayak izi analizi modelinin geliştirilmesi ve bu modelin ilgili kamu kuruluşları, araştırma enstitüleri ve üniversiteler tarafından gelecek ile ilgili sürdürülebilir kalkınma planlamalarında pratik bir model olarak Bakanlığı ve Kalkınma Bakanlığı’nca belirlenen sektörlerle ilişkin sürdürülebilirlik hedeflerinin ulusal ve uluslararası düzeyde izlenebilir hale gelmesi, Türkiye ekonomisinin ulusal ve küresel ölçekte çevresel etkilerinin doğrudan ve dolaylı etkilerinin izlenmesi ve sürdürülebilir kalkınma politikalarında karar vericilere yol gösterilmesi. Son olarak, gelişmiş ülkelerde son yıllarda önem kazanmış sürdürülebilir kalkınma ve yeşil ekonomi konularında Mühendislik ve Sosyal & Beşeri Bilimler arasında ortak araştırmalar için sinerji oluşturulması ve bu konuların Mühendislik ve Sosyal Bilimler müfredatına entegre edilmesi için pilot uygulamaların üniversite bünyesinde yapılması olacaktır. kullanılmasıdır. Geliştirilen bu model, ayrıca T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından da politika üretmek hususunda karar-destek modeli olarak hizmet edebilir.

3. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

3.1. Küresel Girdi-çıkıtı Analizi (Global Input-output Analysis)

Bu projede, Türkiye sektörlerinin sürdürülebilirlik analizi dünya girdi-çıkıtı tabloları (WIOD) kullanılarak gerçekleştirilecektir. 1970 yılında ekonomi alanında Nobel Ödülü kazanmış olan Wassily Leontief tarafından geliştirilen girdi-çıkıtı analizi [32], bir çok araştırmacı tarafından birçok bilimsel çalışmada kullanılarak Amerikan ve Türkiye sektörlerinin çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri analiz edilmiştir. Genel manada girdi-çıkıtı analizi ülke ekonomilerini oluşturan sektörler arasındaki finansal akışı takip ederek, sektörlerin ülke ekonomilerine yaptıkları

doğrudan ve dolaylı parasal etkileri izlemektedir [91,92].

Tek bölgesel girdi-çıkıtı analiz uzun yıllardır sürdürülebilirlik analizi için kullanılsa da, küresel girdi-çıkıtı tabloları kullanılarak yapılan uluslararası ölçekte sürdürülebilirlik analizi çalışmaları oldukça azdır. Küresel çok uluslu girdi-çıkıtı tabloları dünya ülkeleri ve sektörleri arasındaki parasal akışı izlemekte ve sektörlerin bölgesel ve küresel etkilerini hesaba katmaktadır [33,75]. Bu nedenle küresel modeller ulusal ekonomilerinin küresel tedarik zincirlerini izleyerek uluslararası ticareti hesaba katmaktadır [66]. Küresel girdi-çıkıtı tablolarında sektörler arasındaki parasal akış, her bir ülke ve sektör için ithalat ve ihracat değerlerini içermektedir. Ardından tüm ithalat ve ihracat girdileri tek bir girdi-çıkıtı tablosunu dönüştürülerek tek bir matris haline getirilmektedir [73]. Bu çalışmada Avrupa Komisyonu 7. Çerçeve Araştırma Programı tarafından desteklenen dünya girdi-çıkıtı veritabanı (WIOD) kullanılmıştır [73]. Bu kapsamlı veri tabanı toplamda 40 ülkeyi içermekte olup, 27 Avrupa Birliği Üye Ülkesinin yansısı 13 farklı büyük ekonominin 1995 ile 2011 yılları arasındaki girdi-çıkıtı tablolarını içermektedir [73].(Tablo 2'e bakınız). Dünya girdi-çıkıtı veri tabanında, tüm ekonomik veriler ülkelerin ulusal hesapları kullanılarak oluşturulmuştur. Dünya girdi-çıkıtı veri tabanı oluşturulması esnasında kullanılan metot ve verilere ait güncel bilgiler, Timmer [93] ve EuroStat [94] gibi referans kaynaklarda detaylı olarak açıklanmıştır.

Tablo 1: WIOD ülkeleri ve bölgeleri [46] (Table 2: WIOD countries and regions)

Avrupa Bölgesi	Avrupa Bölgesi Dışı Ülkeler	Kuzey Amerika	Çin	Doğu Asya	BRIT AT
Avusturya	Bulgaristan	Kanada	Çin	Japonya	Bre.
Belçika	Çek Cumhuriyeti	Meksika		Kore	Rus.
Kıbrıs	Danimarka	Amerika		Tayvan	Hin.
Estonya	Hırvatistan				Endonezya
Finlandiya	Letonya				Avu. Tür.
Fransa	Litvanya				
Almanya	Polonya				
Yunanistan	Romanya				
İrlanda	İsveç				
İtalya	İngiltere				
Lüksemburg					
Malta					
Hollanda					
Portekiz					
Slovakya					
Slovenya					
İspanya					

Geliştirilecek olan küresel modelde, ARSij matrisi, direk gereklilik matrisini temsil edecektir.

Bu matrisin her bir satırı birim üretim için gerekli olan ulusal ve küresel girdileri göstermektedir. Bu matrisin bir elementi olarak, aRSij, R ülkesinden mevcut bulunan i sektöründen S ülkesindeki j sektörüne giren girdileri temsil etmektedir. Yine bu matriste i ve j her bir ülkenin 35 farklı sektöründen birini temsil ederken, R ve S, WIOD veri tabanındaki toplam 40 ülkeyi göstermektedir. Belirtilen küresel model Leontief modelindeki linear formülleri kullanarak, sektörlerin direk ve dolaylı çıktıları sonucu oluşan toplam ekonomik çıktıyı formül 1' de belirtildiği gibi hesaplanmaktadır [33,52]:

$$x^r = [(I - A^{RS})^{-1}] f_i^r \quad (1)$$

Bu formülde x^r ülke r'deki toplam endüstriyel çıktı vektörünü, I birim matrisi ve f_i^r , r ülkesindeki üretim sektörü i'nin toplam ekonomik çıktısını temsil etmektedir. Tüm bu vektör ve matrisler kullanılarak, Leontief ters matrisini ifade eden $(I - A^{RS})^{-1}$ hesaplanmıştır [32]. Bu matris aynı zamanda toplam gereklilik matrisi olarak da bilinmektedir. Ayrıca A^{RS} Leontief'in girdi-çıkıtı modelinde A matrisi olarak ifade edilmekte ve doğrudan gereklilik matrisi olarak da bilinmektedir. Girdi-Çıkıtı tablolarını kullanarak simetrik girdi-çıkıtı tablolarının oluşturulması, EuroStat ve Birleşmiş Milletler'in hazırlanmış olduğu girdi-çıkıtı analizi el kitapçıklarında detaylı bir şekilde açıklanmıştır [94,95]. Dünya girdi-çıkıtı modeli formül 2 kullanılarak kurulduktan sonra, sektörlerin toplam sürdürülebilirlik etkileri sektörlerin toplam üretiminin çoğaltan matrisi ile çarpılması ile hesaplanmaktadır [66]:

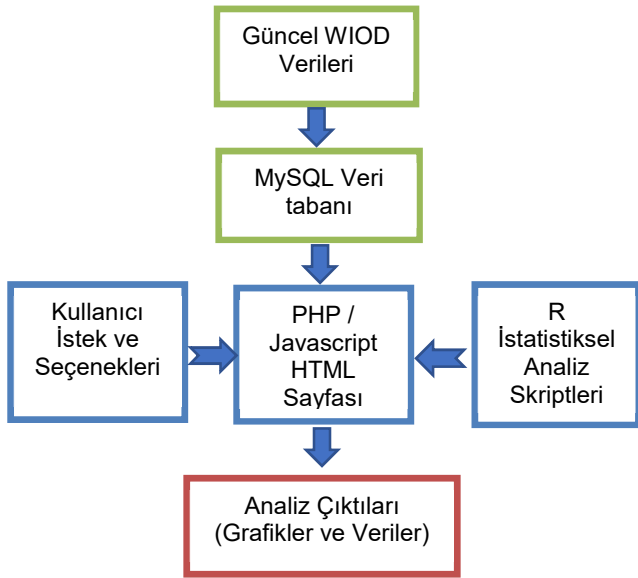
$$r = E_{dir} x = E_{dir} [(I - A^{RS})^{-1}] f \quad (2)$$

Bu formülde, r vektörü birim üretime karşılık gelen toplam çevresel, ekonomik ve yada sosyal etkileri göstermektedir. Yine E_{dir} matrisi sektörlerin bir milyon liralık üretimine karşılık gelen çevresel, ekonomik yada sosyal etkileri temsil etmektedir. Örneğin, Türkiye elektrik üretim sektörün 1 milyon liraya karşılık gelen ulusal ve küresel enerji kullanım miktarı hesaplanmak istenirse, f vektörü 'Elektrik Enerjisi Üretim' sektörü için 1 milyon dolar olarak model girilecek ve diğer tüm dünya ülkelerinin sektörleri için sıfır olacaktır. Yine E_{dir} matrisi tüm sektörlerin 1 milyon liraya karşılık gelen doğrudan enerji kullanım miktarını gösterecek ve diyagonal bir matris olacaktır. Bu modelde, E_{dir} ve köşeli parantezle gösterilmiş $[(I - A^{RS})^{-1}]$ teriminin çarpımı çoğaltan matrisi olarak ifade edilmektedir. Belirtilen küresel model kurulduktan sonra Ana İş Paketi 1'de belirlenen ve model için hazır hale

getirilecek olan çevresel, ekolojik, ekonomik ve sosyal indikatörler modele entegre edilerek, tercih edilen sektörün bölgesel ve küresel tedarik zinciri kaynaklı etkileri hesaplanacaktır. Her bir sektörün toplam ekonomik çıktı değerleri yine WIOD veri tabanından 1995 ve 2011 yılları için elde edilecektir.

3.2. Sistem Mimarisi ve Web-tabanlı Model (System Architecture and Web-based Model)

Sistem tamamen açık kaynak kodlu bileşkelere oluşmaktadır. Sistemin ana altyapısını PHP ve Javascript kodları oluşturup sistemdeki HTML internet sayfalarına gömülmüştür. İstatistiksel analizi gerçekleştiren kodlar profesyonel R istatistiksel programlama dilinde yazılmıştır. Sistemde öncelikle güncel WIOD verileri veri tabanı motoru MySQL'e aktarılmaktadır. Kullanıcının istek ve seçenekleri PHP/Javascript tabanlı internet sayfasından alınıp ve bu analiz isteğini gerçekleştirecek olan ilgili R kodu çalışmaktadır. Akabinde kodun çıktıları olan grafikler ve ilgili veriler kullanıcıya gösterilmektedir. Ayrıca kullanıcıya grafikleri ve verileri saklama opsiyonu sağlanmaktadır. Grafiklerin oluşturulmasında Javascript tabanlı HighCharts modülü kullanılmıştır. PHP kodları PHPStorm ortamında, R kodları ise R Studio ortamında geliştirilmiştir. Şekil 1.'de sistem mimarisi ifade gösterilmiştir.



Şekil 1. Sistem mimarisi

Makalede geliştirilmiş olan model Sürdürülebilir Sistemler ve Çözümler Laboratuvarı'nın (Sustainable Systems and Solutions Lab-bakınız: <https://sustainabilitylab.herokuapp.com>) internet sitesinde Küresel Karbon Hesaplama Modeli

“Global Carbon Accounting Tool (G-CAT)” olarak kullanıcılara pratik sürdürülebilirlik analizi yapma imkanı vermektedir. 5 adımda sürdürülebilirlik analiz yapma imkanı sağlayan bu modelin aşamaları aşağıda belirtilmiştir:

- *Adım 1:* Model yılını seç: Kullanıcı 2000 ile 2009 arasında analiz etmek istediği herhangi bir yılı seçecektir.
- *Adım 2:* Analiz etmek istediğin üretim yada servis sektörlerinden birini seç: Bu adımda kullanıcı analiz etmek istediği üretim yada servis sektöründen birini seçecektir. Örneğin, kullanıcı İnşaat sektörünün sürdürülebilirlik analizini yapmak isterse ‘Construction’ sektörünü listeden seçecektir.
- *Adım 3:* Sektörde meydana gelen ekonomik aktiviteyi milyon dolar (\$) cinsinden modele gir: Bu adımda kullanıcı sektörde oluşan ekonomik aktiviteyi milyon dolar cinsinden modele girecektir. Örneğin, kullanıcı inşaat sektöründe 1 milyon dolara bağlı oluşan etkileri analiz etmek isterse, 2. adımda inşaat sektörünü seçtikten sonra 3. adımda modele 1 milyon dolar girecektir. Bu rakam inşaat sektöründen 1 milyon dolar değerinde (üretim maliyeti olarak) ürün çıktısı almamız halinde, kendisinde ve tedarik zincirinde oluşan etkilileri açığa çıkarmayı hedeflemektedir.
- *Adım 4:* İndikatör secimi: Bu aşamada kullanıcı analiz etmek istediği indikatörü seçecektir. Modelin şu anki halinde sadece karbon ayakizi analizi yapılabilmektedir. Modelin onumuzdaki yıllarda geliştirilecek olan versiyonlarında, çeşitli ekonomik, çevresel, ve sosyal etkileri de hesaplamak mümkün olacaktır. Örneğin, kullanıcı inşaat sektörünün sosyal etkilerini analiz etmek isterse 4. adımda gelir, iş kazası, araştırma ve geliştirmeye olan katkı, vergi gibi indikatörlerden birini seçecektir.
- *Adım 5:* Modeli çalıştır ve sonuçları al: Bu adım geliştirilmiş olan modelin son adımı olup kullanıcı ilk 5 adımda tercihlerini yaptıktan sonra sonuçları almak üzere modeli çalıştıracaktır. Sonuçlar sektörlerin ulusal ve küresel karbon ayak izini verecek şekilde sunulacak ve ulusal ve küresel tedarik zincirindeki tüm sektörlerin etkileri sayısal olarak verilecektir. Bu noktada model çıktısı olarak 4 farklı analiz kullanıcılara sunulmaktadır:

1. *Zaman-serisi analizi*: Zaman serisi analizi zamana göre karbon ayak izinin nasıl değiştiğini görmek için elverişli bir analiz tipidir. Bu geliştirilmiş modelin hazır bir analiz çıktısı olmayıp, kullanıcının analizi her yıl için ayrıca yapmasını ve dışarıda kendi seçimine ve önceliklerine göre yapabileceği bir analizdir. Sonuçlar kısmında detaylı bir biçimde bu analizin sonuçları ele alınacaktır.

2. *Kapsam-bazlı Karbon Ayak İzi Analizi*: Bu analiz kullanıcılara üretim ve servis sektörlerinin Kapsam 1, 2 ve 3 (Scope 1, 2, 3) karbon ayak izini hesaplama imkanı sağlayacaktır. Bu analiz özellikle WBCSD & WRI tarafından geliştirilmiş olup Avrupa Birliği Çevre Komisyonu tarafından sektörlerin karbon ayak izlerinin izlenmesi konusunda kullanılmaktadır. Sonuçlar kısmında inşaat sektörünün kapsam-bazlı analizi örnek olarak sunulmuştur. Bu analize göre, Kapsam 1 sektörün kendi içerisinde yaptığı salınımlar (onsite), Kapsam 2 sektörün üretimi dolayısı ile enerji sektöründe neden olduğu karbon salınımları, Kapsam 3 ise bunlar dışında yer alan tüm Karbon salınımlarını (sektörün üretimi dolayısı ile tedarik zincirindeki tüm salınımlar) kapsamaktadır.

3. *Üretim ve Tüketim Odaklı Analiz*: Bu analiz kullanıcılara üretim ve servis sektörlerinin sürdürülebilirlik etkilerinin ülke bazında karşılaştırma imkanı sağlayacaktır. Bu analizde sektörün kendi içerisinde doğrudan neden olduğu salınımlar ve dolaylı yoldan (yani tüm tedarik zinciri) neden olduğu salımlar ayrı ayrı incelenmektedir. Sonuçlar kısmında sunulan program çıktısında Türkiye İnşaat sektörünün karbon ayak izi direk (direct) ve dolaylı (upstream) etkilerinin dağılımı sunulmuştur.

4. *Küresel Etki Lokasyon Analizi*: Bu analiz kullanıcılara üretim ve servis sektörlerinin ulusal ve küresel etkilerinin lokasyonu belirleme imkanı sağlayacaktır. Herhangi bir sektörün üretimi dolayısı ile ülke içerisinde ve dışarısında ne kadar karbon salınımına neden olduğu açığa çıkarılmaktadır. Bu çalışmada Türkiye inşaat sektörünün ekonomik aktiviteleri sonucunda küresel ölçekte her ülkede ne kadar karbon salınımına neden olduğu analiz edilmiştir.

Bu dört analiz dışında, G-CAT modeli yardımı ile Tedarik Zinciri Etki Lokasyon analizi de yapılabilir. Bu analiz kullanıcılara üretim ve servis sektörlerinin sürdürülebilirlik etkilerinin lokasyonunu (tedarik zinciri bileşenlerini) belirleme imkanı sağlayacaktır. Örneğin inşaat sektörünün tedarik zincirinde yer alan ulaştırma

sektörünün inşaat sektörü aktiviteleri dolayısı ile ne kadar karbon salınımı yaptığı net olarak görülebilir. Bu çalışmada bu analiz yapılmamış olup, dilendiği takdirde web sitesi yardımı ile yapılabilecek bir analizdir.

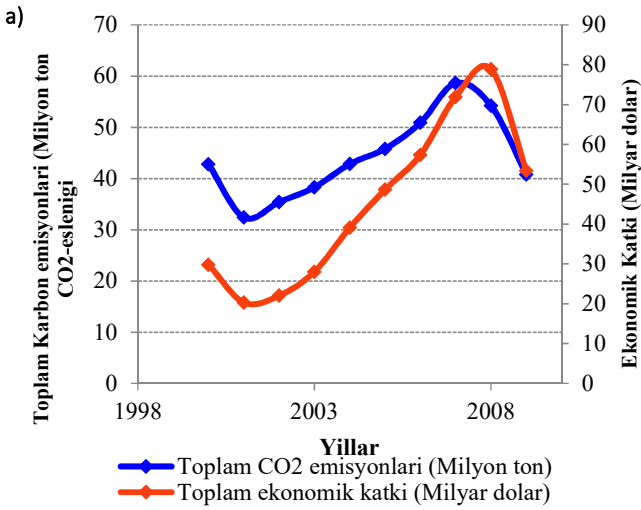
4. BULGULAR (RESULTS)

Türkiye inşaat sektörünün kapsamlı karbon ayak izi sonuçları bu bölümde sunulmuştur. Bulgular geliştirilen G-CAT modelinin dört farklı analizini 2000-2009 yılları arasında göstermektedir. Bu analizler sırası ile zaman-serisi analizi, kapsam bazlı karbon ayak izi, üretim-tüketim bazlı etki analizi ve küresel etki lokasyon analizi olarak sunulmuştur.

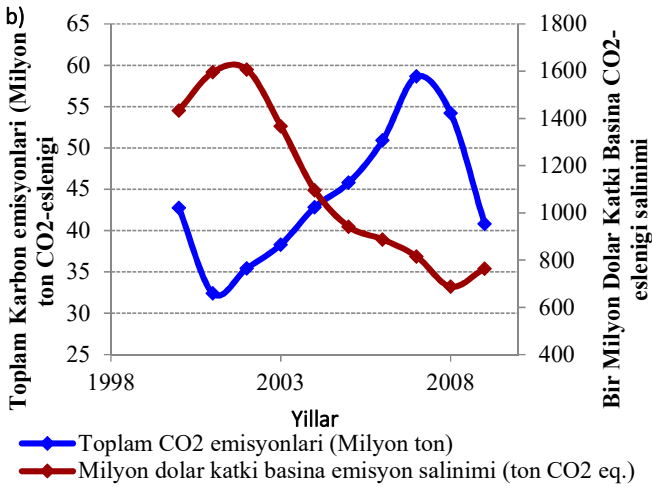
4.1. Zaman Serisi Analizi (Time-series Analysis)

Zaman serisi analizi Türkiye inşaat sektörünün 2000 ve 2009 yılları arasında karbon salımının nasıl değiştiğini göstermektedir. Geleneksel karbon analizleri tedarik zincirinin ilk iki veya üç katmanını hesaba katmasına karşın, bu çalışmada uygulanan ekonomik girdi-çıkıta analizi sayesinde tedarik zincirinin tüm katmanlarının toplamını hesaba katmamız mümkün olmuştur. Sekil 2 Türkiye inşaat sektörünün 2000-2009 yılları arasındaki toplam karbon salınımını yine aynı sektörün toplam ekonomik katkısı (GSMH cinsinden) karşılaştırmaktadır. Sekide de görüldüğü gibi inşaat sektöründeki karbon salınımı ve ekonomik katkısı 2008 yılına kadar artan bir davranış sergilemektedir. 2008 yılındaki küresel krizin etkisi ile daralan sektör, ekonomik katkısı ve dolayısı ile karbon salınımı da sektördeki ve tedarik zincirindeki salınımın azaldığı gözlenmiştir. Şekil 2 Türkiye inşaat sektörünün karbon salınımının ve ekonomik katkısının arasında pozitif bir korelasyon olduğunu gösterse de, bu sektörün zamanla karbon salınımının birim üretim başına azalıp azalmadığını göstermemektedir. Burada sektörün birim üretim başına (örneğin 1 milyon dolar değerine karşılık gelen üretim başına) yaptığı salınım sektörün çevresel performansı ve verimliliği hakkında çok daha net bir bilgi sağlayabilir. Bu nedenle zaman-serisi analizi kapsamında, Şekil 3, inşaat sektörünün toplam emisyonlarına karşın birim üretim başına azalan bir emisyon salınımı göstermektedir. Yani Sekil 1 ve Şekil 3'ü beraber ele alırsak, büyük resimde inşaat sektörünün ekonomik büyüklüğü ve üretimi bu yıllar arasında artış gösterirken birim üretim başına karbon

salınımı azalmaktadır. Bu sonucun birçok farklı sebebi olabileceği gibi, enerji verimliliği daha yüksek teknolojiler kullanılması ve tedarik zincirinde daha verimli seçimler yapılması birim üretim başına karbon salınımının azalmasını önemli iki sebebi olabilir. Zaman serisi analizinin gösterdiği bir diğer önemli sonuç da, sektörün ekonomik büyümesindeki artış hızı, sektörün birim üretim başına karbon salınımının azalma hızından daha fazla olduğu görülmektedir. Yani sektördeki büyümeden kaynaklı emisyonlar, verimlilik artışından dolayı azaltılan karbon salınımlarından daha fazla olduğu için, inşaat sektörünün toplam emisyonları bu yıllar arasında artmıştır.



Şekil 2. Toplam karbon salınımı ve ekonomik katkı karşılaştırması (Comparison of total carbon emissions and economic value-added)

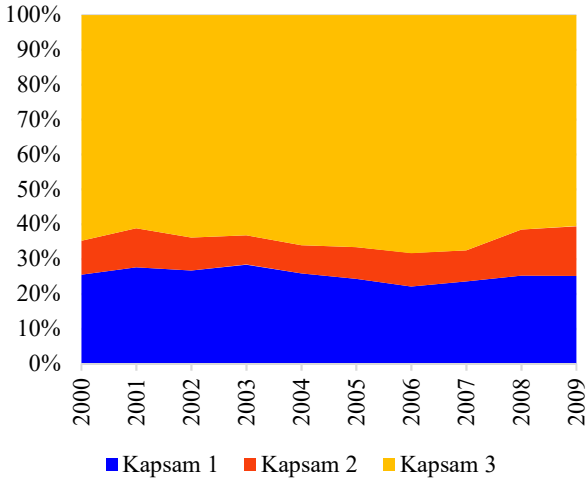


Şekil 3. Toplam karbon salınımı ve birim üretim başına karbon salınımı karşılaştırması (Comparison of total carbon emissions and carbon emissions per economic value-added)

4.2. Kapsam Bazlı Karbon Ayak İzi (Scope-based Carbon Footprint)

Kapsam bazlı analiz is dünyasında karbon raporlamasında kullanılan en yaygın ve kabul gören karbon hesaplama yöntemi olması sebebiyle, Türkiye inşaat sektörünün uluslar arası standartlara göre büyük resimdeki durumunu göstermektedir. İş Dünyası ve Sürdürülebilir Kalkınma Derneği (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) ve Dünya Kaynakları Enstitüsü (World Resource Institute, WRI) tarafından geliştirilmiş olması sebebiyle kapsam bazlı analiz farklı ülkeler ve farklı sektörlerin standartlara uygun bir şekilde karşılaştırılmasına da olanak sağlamaktadır.

Şekil 4 Türkiye inşaat sektörünün kapsam bazlı karbon ayak izini 2000-2009 yılları arasında nasıl değiştiğini göstermektedir. Analize göre, Türkiye inşaat sektörünün emisyonlarının yaklaşık %60'lık bir kısmı tedarik zincirinde meydana gelmektedir. Bu rakam enerji sektörü de dahil edilirse yaklaşık %70 gibi bir oran olmaktadır. 2000-2009 yılları arasında genel durumda çok ciddi değişiklikler olmayıp, sektörün kendi içerisinde ürettiği (saha içerisindeki inşaat aktiviteleri dolayısı ile) karbon salınımları %25 ile %20 arasında değişmektedir. Bu bulgunun en önemli yönlerinden birisi sektörün standardize edilmiş bir karbon hesaplama yöntemi ile analiz edilmesi ve diğer ülkelerin inşaat sektörleri ile karşılaştırma yapılmasına olanak sağlayabilmesidir. Yine Türkiye'deki inşaat firmaları kendi karbon ayak izlerini bu yöntemle göre hesaplayıp kendi performanslarını ülke ortalamasının gözüktüğü sonuç (bknz: Şekil 2) ile karşılaştırmalarına olanak sağlamaktadır. Bu analizin bir başka önemli sonucu da, sektördeki salınımların daha çok tedarik zincirinde olduğu ve tedarik zincirindeki seçimlerin sektörün salınımlarında çok etkili olduğudur.

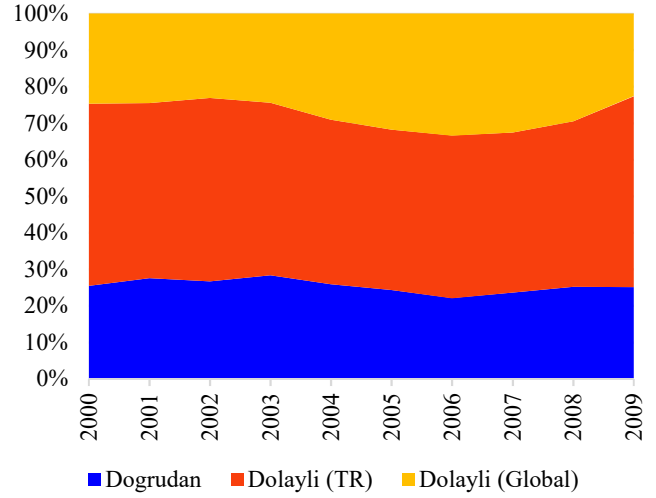


Şekil 4 Türkiye in aat sektörünün 2000-2009 yılları arasında kapsam bazlı karbon ayak izi (Scope-based carbon footprint of Turkish Construction Sector between 2000-2009)

4.3. Üretim-Tüketim Bazlı Karbon Ayak izi (Production-Consumption Based Carbon Footprint)

Üretim-tüketim bazlı karbon ayak izi (bknz: Sekil 5) kapsam-bazlı analizde olduğu gibi Türkiye in aat sektörünün doğrudan ve dolaylı karbon salınımlarının 2000-2009 yılları arasında nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu analizdeki doğrudan salınımlar bir önceki kapsam-bazlı analizdeki Kapsam 1 emisyonlarına karşılık gelmektedir. Dolaylı olan emisyonlar ise ülke içerisinde ve dışarısında olmak üzere iki kısımda gösterilmiştir. Analize göre, Türkiye in aat sektörünün ülke içerisinde olan dolaylı karbon salınımları %45 ile %50 arasında değişmektedir. Bu rakam direk emisyonları da katarsak, emisyonların yaklaşık farklı yıllarda %75 ile %80'i arasında değiştiği görülmektedir. İn aat sektörünün yurt içi üretiminin, yurt dışında oluşturduğu salınımlar ise %20 ile %25 arasında değişmektedir. Yine bu sonuç Türkiye'nin karbon salınımlarının düzenlemesi ile ilgili kontrol edebileceği oranları da göstermektedir. Türkiye in aat sektörünün kendisi ve yurt içinde yer alan tedarikçilerini gösteren mavi ve turuncu alan (yaklaşık karbon salınımlarının %80'i) Türkiye'nin kontrol edebileceği bir alan olup, buradaki sektörlerde geliştirilecek olan politikalar ile hem in aat sektörünün hem de tedarikçilerinin karbon salınımları daha kontrollü bir şekilde izlenebilir. Detaylı tedarik zinciri analizleri yapmadan evvel, in aat sektörünün tedarik zincirinde oluşan emisyonlarının genel olarak tedarik zincirinde hangi sektörleri ilgilendirdiği belirlenebilir. Yıllar arasındaki değişimler doğrudan Türkiye'nin dışarıdan tedarik ettiği

in aat ile ilgili ürünlerin (örneğin sektörün ihtiyaç duyduğu bir beton pompası, in aat demiri, vb.) farklı tedarikçilerden veya farklı mesafelerden gelmesi ile açıklanabilir. Bu sonuç ülkenin ekonomik politikaları ile doğrudan alakası olup, farklı ülkeler ile yapılan ticari faaliyetlerin karbon salınımlarına etkisi olmaktadır.

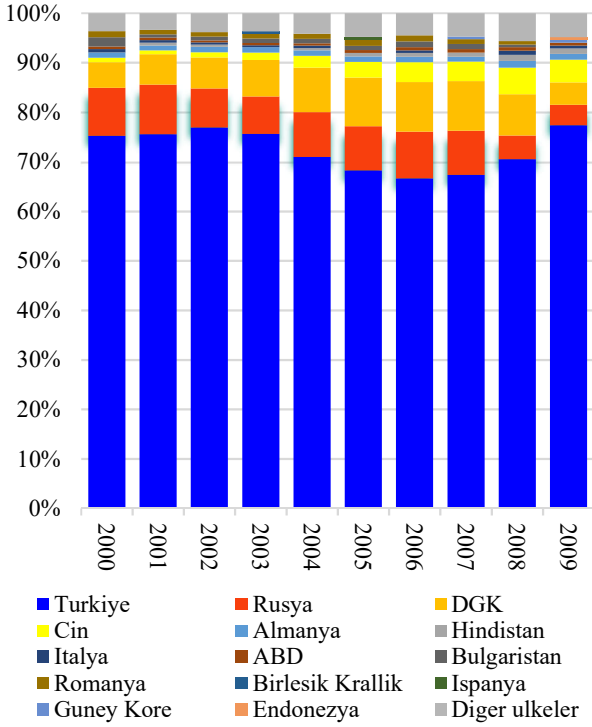


Şekil 5 Türkiye in aat sektörünün 2000-2009 yılları arasında üretim-tüketim bazlı karbon ayak izi (Production-Consumption based carbon footprint of Turkish Construction Sector between 2000-2009)

4.4. Küresel Etki Lokasyon Analizi (Global Impact Location Analysis)

Küresel etki lokasyon analizi Türkiye in aat sektörünün yurt içerisinde yapmış olduğu üretim (in aat faaliyetleri) dolayısı ile global ölçekte hangi ülkelerde dolaylı olarak karbon salınımlarına neden olduğunu göstermektedir. Sekil 6.'da görüldüğü üzere, Türkiye in aat sektörünün karbon salınımlarının büyük kısmı yaklaşık %70-75'i ülke içerisinde Türkiye in aat sektörü ve sektörün ülke içerisindeki tedarikçilerinden kaynaklandığı gözükmektedir. Buna karşın, global ölçekte bakıldığında, terdik zincirinde en çok etkiyi Rusya'da oluşturduğu görülmektedir. Sekil 5. Türkiye in aat sektörünün üretimi dolayısı ile oluşan karbon salınımlarının en çok olduğu 10 ülkeyi göstermektedir. Bu ülkeler arasında, dünya-girdi çıktı veri tabanına göre tanımlanan 40 ülke dışında kalan ülkeler, dünyanın geri kalanı (DGK) olarak tanımlanmıştır. DGK ile beraber toplam 41 ülke incelenmiş ve başı çeken 10 ülke Sekil 5'de gösterilmiştir. Bu 10 ülke dışındakiler ise Sekil 6'da diğer ülkeler adi altında gösterilmiştir. Analize göre, Rusya ve DGK Türkiye in aat sektörünün tedarik zincirinde en çok karbon salınımları oluşan ülkelerdir. Ayrıca, Çin'in tedarik zincirindeki etkisi 2000 yılından itibaren giderek artmaktadır. Bu analiz yardımı ile, Türkiye in aat

sektörünün global ölçekteki karbon salınım etkileri açığa çıkarılmış ve uluslar arası platformlarda karbon salınımları konusunda Türkiye inşaat sektörünün ülke dışında çok fazla bir etkisi olmadığı, olan ülkelerinde başlıca Rusya, Çin, ve DGK olduğu gösterilmiştir.



Şekil 6 Türkiye inşaat sektörünün 2000-2009 yılları arasındaki karbon salınımlarının küresel etki dağılımı. (Global distribution of carbon emissions from Turkish Construction Sector between 2000-2009)

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada web tabanlı global karbon ayak izi hesaplama modeli geliştirilmiş ve test edilmiştir. Geliştirilen model ile Türkiye inşaat sektörü kapsamlı bir şekilde incelemiş ve sektörün karbon salınımlarının 2000-2009 yılları arasında nasıl değiştiğini, zaman serisi analiz, Kapsam odaklı, üretim-tüketim odaklı, ve küresel etki lokasyon analizi gibi yenilikçi analizler ile gösterilmiştir. Analiz sonuçlarına inşaat sektöründeki büyümeden kaynaklı salınımlar, 2000-2009 yılları arası verimlilik artışından dolayı azalan karbon salınımlarına göre daha fazla olduğu için, sektörün bu yıllar arası toplam salınımı artmıştır. İnşaat sektörünün Kapsam 2 ve 3 karbon salınımları (dolaylı salınımlar) sektörün toplam emisyonlarının ortalama %80'ine karşılık gelmektedir ve sektörün emisyonlarını düşürmek için tedarik zinciri ile beraber değerlendirilmesi gerekmektedir. İnşaat sektörü'nün Türkiye

dışında en çok salınım oluşturduğu ülkeler Rusya, DGK, ve Çin olarak bulunmuştur. Bu bulgular ışığında, sektörün salınımlarının düşürülmesi için sadece inşaat sektörü içerisinde değil, tedarikçileri de değerlendirerek politikalar üretilmelidir.

Türkiye sürdürülebilir kalkınma hedefleri doğrultusunda lokomotif sektörlerinden birisi olan inşaat sektörünün etkilerini düzenle ve kapsamlı olarak incelemeli ve kalkınma hedefleri doğrultusunda politikalar üretmelidir. Bu çalışma bu yönde önemli bir girişim olup, inşaat sektörüne ek olarak Türkiye'deki tüm sektörlerinin de analiz edilebileceği web-tabanlı bir model olan küresel karbon ayak izi hesaplama (G-CAT) modelini Türkiye literatürüne kazandırmıştır. Geliştirilen bu model Türkiye'de politika üreticiler ve karar vericiler için önemli ve faydalı bir karar-destek modeli olarak hizmet edebilir. Yine Türkiye'de iklim değişikliği ile ilgili çalışan araştırmacılar ve bilim insanlarının kullanımına sunulmuştur. Türkiye'nin uluslar arası iklim müzakerelerine daha hazırlıklı olması için sektörlerini düzenli bir şekilde incelemesi ve gerekli politikaları doğru zamanda üretmesi gerekmektedir. 1992 yılından bu yana devam eden iklim müzakereleri son olarak Paris anlaşması ile sonuçlanmıştır. Katılan 195 ülkenin anlaşmaya varması iklim değişikliği açısından çok önemli bir yere sahiptir. Türkiye sürdürülebilir kalkınma hedeflerini düşük-karbon ekonomisi oluşturacak şekilde yapılandırması, Türkiye'nin de onayladığı Paris Anlaşmasını bir önemli bir fırsata dönüştürebilir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Brundtland Commission. Our Common Future. 1987.
- [2] Birleşmiş Milletler Çevre Programı (United Nations Environmental Programme U. Towards a green economy. 2011.
- [3] Dünya Sürdürülebilir Kalkınma Zirvesi. Report of the United Nations Conference on Sustainable Development. n.d.
- [4] Elkington J. Cannibals with forks. Triple Bottom Line 21st Century 1997.
- [5] Kucukvar M. Life Cycle Sustainability Assessment Framework for the U.S. Built Environment. Doctoral dissertation, University of Central Florida, Orlando, 2013.
- [6] Türkiye İnşaat Sanayicileri İşveren Sendikası (Intes). İnşaat Sektörü Raporu. 2016.

- [7] Guinée JB, Heijungs R, Huppes G, Kleijn R, de Koning A, van Oers L, et al. life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. 2002. doi:10.1007/BF02978784.
- [8] Zamagni A, Guinée J, Masoni P, Heijungs R. Life Cycle Sustainability Analysis, in Life Cycle Assessment Handbook: A Guide for Environmentally Sustainable Products. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.; 2012. doi:10.1002/9781118528372.
- [9] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O. Uncertainty-embedded dynamic life cycle sustainability assessment framework: An ex-ante perspective on the impacts of alternative vehicle options. *Energy* 2016;112:715–28. doi:10.1016/j.energy.2016.06.129.
- [10] Zhao Y, Onat NC, Kucukvar M, Tatari O. Carbon and energy footprints of electric delivery trucks: A hybrid multi-regional input-output life cycle assessment. *Transp Res Part D Transp Environ* 2016;47:195–207. doi:10.1016/j.trd.2016.05.014.
- [11] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. *Appl Energy* 2015;150:36–49. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.001.
- [12] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O. Scope-based carbon footprint analysis of U.S. residential and commercial buildings: An input–output hybrid life cycle assessment approach. *Build Environ* 2014;72:53–62.
- [13] Junnila S, Horvath A, Guggemos AA. Life-Cycle Assessment of Office Buildings in Europe and the United States. *J Infrastruct Syst* 2006;12:10–7. doi:10.1061/(ASCE)1076-0342(2006)12:1(10).
- [14] Park YS, Egilmez G, Kucukvar M. Emergy and end-point impact assessment of agricultural and food production in the United States: A supply chain-linked Ecologically-based Life Cycle Assessment. *Ecol Indic* 2016;62:117–37. doi:10.1016/j.ecolind.2015.11.045.
- [15] Samaras C, Meisterling K. Life Cycle Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Plug-in Hybrid Vehicles: Implications for Policy. *Environ Sci Technol* 2008;42:3170–6. doi:10.1021/es702178s.
- [16] Onat NC, Gumus S, Kucukvar M, Tatari O. Application of the TOPSIS and intuitionistic fuzzy set approaches for ranking the life cycle sustainability performance of alternative vehicle technologies. *Sustain Prod Consum* 2016;6:12–25. doi:10.1016/j.spc.2015.12.003.
- [17] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O, Zheng QP. Combined application of multi-criteria optimization and life-cycle sustainability assessment for optimal distribution of alternative passenger cars in U.S. *J Clean Prod* 2016;112:291–307. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.021.
- [18] Kucukvar M, Tatari O. A comprehensive life cycle analysis of cofiring algae in a coal power plant as a solution for achieving sustainable energy. *Energy* 2011;36:6352–7. doi:10.1016/j.energy.2011.09.039.
- [19] Noori M, Zhao Y, Onat NC, Gardner S, Tatari O. Light-duty electric vehicles to improve the integrity of the electricity grid through Vehicle-to-Grid technology: Analysis of regional net revenue and emissions savings. *Appl Energy* 2016;168:146–58. doi:10.1016/j.apenergy.2016.01.030.
- [20] Huntzinger DN, Eatmon TD. A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *J Clean Prod* 2009;17:668–75. doi:10.1016/j.jclepro.2008.04.007.
- [21] Hertwich EG. Life cycle approaches to sustainable consumption: a critical review. *Environ Sci Technol* 2005;39:4673–84.
- [22] Kloepffer W. Life cycle sustainability assessment of products. *Int J Life Cycle Assess* 2008;13:89–95.
- [23] Guinée JB, Heijungs R, Huppes G, Zamagni A, Masoni P, Buonamici R, et al. Life cycle assessment: past, present, and future. *Environ Sci Technol* 2011;45:90–6. doi:10.1021/es101316v.
- [24] Finkbeiner M, Schau EM, Lehmann A, Traverso M. Towards Life Cycle Sustainability Assessment. *Sustainability* 2010;2:3309–22. doi:10.3390/su2103309.



- [25] Traverso M, Finkbeiner M, Jørgensen A, Schneider L. Life Cycle Sustainability Dashboard. *J Ind Ecol* 2012;16:680–8. doi:10.1111/j.1530-9290.2012.00497.x.
- [26] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O. Integrating triple bottom line input-output analysis into life cycle sustainability assessment framework: The case for US buildings. *Int J Life Cycle Assess* 2014;19:1488–505. doi:10.1007/s11367-014-0753-y.
- [27] Kucukvar M, Tatari O. Towards a triple bottom-line sustainability assessment of the US construction industry. *Int J Life Cycle Assess* 2013.
- [28] Suh S, Lenzen M, Treloar GJ, Hondo H, Horvath A, Huppes G, et al. System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. *Environ Sci Technol* 2004;38:657–64. doi:10.1021/es0263745.
- [29] Wiedmann TO, Lenzen M, Barrett JR. Companies on the Scale. *J Ind Ecol* 2009;13:361–83.
- [30] Tatari O, Nazzal M, Kucukvar M. Comparative sustainability assessment of warm-mix asphalts: A thermodynamic based hybrid life cycle analysis. *Resour Conserv Recycl* 2012;58:18–24. doi:10.1016/j.resconrec.2011.07.005.
- [31] Hendrickson CT, Lester BL, Matthews HS. Environmental Life Cycle Assessment of Goods And Services: An Input-Output Approach. Washington DC: 2006.
- [32] Leontief W. Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *Rev Econ Stat* 1970;52:262–71.
- [33] Miller RE, Blair PD. Input–output analysis: foundations and extensions. 2nd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press; 2009.
- [34] Carnegie Mellon University Green Design Institute. Economic Input-Output Life Cycle Assessment (EIO-LCA) 2008. <http://www.eiolca.net/index.html>.
- [35] Murray J, Wood R. The sustainability practitioner’s guide to input-output analysis 2010.
- [36] Horvath A, Hendrickson C. Comparison of environmental implications of asphalt and steel-reinforced concrete pavements. *Transp Res Rec* ... 1998.
- [37] Hendrickson C, Horvath A. Resource Use and Environmental Emissions of U.S. Construction Sectors 2000.
- [38] Noori M, Kucukvar M, Tatari O. Economic input-output based sustainability analysis of onshore and offshore wind energy systems. *Int J Green Energy*, Taylor Fr (Under Rev 2013).
- [39] Noori M, Kucukvar M, Tatari O. Environmental Footprint Analysis of On-shore and Off-shore Wind Energy Technologies. 2012 IEEE ISSST Int. Symp. Sustain. Syst. Technol. Co-organized with IEEE Soc. Soc. Implic. Technol., Boston, MA: 2012.
- [40] Onat NC, Egilmez G, Tatari O. Towards greening the U.S. residential building stock: A system dynamics approach. *Build Environ* 2014;78:68–80. doi:10.1016/j.buildenv.2014.03.030.
- [41] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O. Conventional, hybrid, plug-in hybrid or electric vehicles? State-based comparative carbon and energy footprint analysis in the United States. *Appl Energy* 2015;150. doi:10.1016/j.apenergy.2015.04.001.
- [42] Tatari O, Kucukvar M, Onat NC. Towards a Triple Bottom Line Life Cycle Sustainability Assessment of Buildings. *Sci. Sustain. Constr. Manuf. Work. Vol. I. Position Pap. Find.*, 2015, p. 226.
- [43] Ercan T, Onat NC, Tatari O. Investigating carbon footprint reduction potential of public transportation in United States: A system dynamics approach. *J Clean Prod* 2016;133:1260–76. doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.051.
- [44] Ercan T, Onat NC, Tatari O, Mathias J-D. Public transportation adoption requires a paradigm shift in urban development structure. *J Clean Prod* 2016. doi:10.1016/j.jclepro.2016.11.109.
- [45] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O, Egilmez G. Integration of system dynamics approach toward deepening and broadening the life cycle sustainability assessment framework: a case for electric vehicles. *Int J Life Cycle Assess* 2016;21:1009–34. doi:10.1007/s11367-016-1070-4.

- [46] Onat NC. A macro-level sustainability assessment framework for optimal distribution of alternative passenger vehicles. University of Central Florida, 2015.
- [47] Onat NC, Noori M, Kucukvar M, Zhao Y, Tatari O, Chester M. Exploring the suitability of electric vehicles in the United States. *Energy* 2017;121. doi:10.1016/j.energy.2017.01.035.
- [48] Alirezaei M, Onat NC, Tatari O, Abdel-Aty M. The Climate Change-Road Safety-Economy Nexus: A System Dynamics Approach to Understanding Complex Interdependencies. *Systems* 2017;5:6.
- [49] Tatari O, Onat N, Abdel-Aty M, Alirezaei M. Dynamic Simulation Models for Road Safety and Its Sustainability Implications 2015.
- [50] Onat NC, Kucukvar M, Tatari O. Towards Life Cycle Sustainability Assessment of Alternative Passenger Vehicles. *Sustainability* 2014;6:9305–42. doi:10.3390/su6129305.
- [51] Egilmez G, Kucukvar M, Tatari O, Bhutta MKS. Supply chain sustainability assessment of the U.S. food manufacturing sectors: A life cycle-based frontier approach. *Resour Conserv Recycl* 2014;82:8–20. doi:10.1016/j.resconrec.2013.10.008.
- [52] Kucukvar M, Egilmez G, Onat NC, Samadi H. A global, scope-based carbon footprint modeling for effective carbon reduction policies: Lessons from the Turkish manufacturing. *Sustain Prod Consum* 2015;1:47–66. doi:10.1016/j.spc.2015.05.005.
- [53] Wiedmann T, Wilting HC, Lenzen M, Lutter S, Palm V. Quo Vadis MRIO? Methodological, data and institutional requirements for multi-region input–output analysis. *Ecol Econ* 2011;70:1937–45. doi:10.1016/j.ecolecon.2011.06.014.
- [54] Foran B, Lenzen M, Dey C. Balancing Act a Triple Bottom Line Analysis of the Australian Economy Volume 1. In: CSIRO, editor. *Balanc. Act*, vol. 358, CSIRO; 2005, p. 277.
- [55] Wiedmann T, Lenzen M. Triple-Bottom-Line Accounting of Social, Economic and Environmental Indicators-A New Life-Cycle Software Tool for UK Businesses. ... *Creat Cult Perth* Retrieved from ... 2006.
- [56] Foran B, Lenzen M, Dey C. Balancing Act: a triple bottom line analysis of the Australian economy. vol. 1. 2011.
- [57] Wiedmann T, Minx J. A Definition of ‘Carbon Footprint. *Science* (80-) 2007;1:1–11.
- [58] Malik A, Lenzen M, Geschke A. Triple bottom line study of a lignocellulosic biofuel industry. *GCB Bioenergy* 2016;8:96–110. doi:10.1111/gcbb.12240.
- [59] Kucukvar M, Tatari O. Towards a triple bottom-line sustainability assessment of the U.S. construction industry. *Int J Life Cycle Assess* 2013;18:958–72. doi:10.1007/s11367-013-0545-9.
- [60] Noori M. Sustainability assessment of wind energy for buildings 2013.
- [61] Ercan T, Kucukvar M, Tatari O, Al-Deek H. Congestion Relief Based on Intelligent Transportation Systems in Florida. *Transp Res Rec J Transp Res Board* 2013;2380:81–9. doi:10.3141/2380-09.
- [62] Tatari O, Kucukvar M. Eco-Efficiency of Construction Materials: Data Envelopment Analysis. *J Constr Eng Manag* 2012;138:733–41. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000484.
- [63] Kucukvar M, Noori M, Egilmez G, Tatari O. Stochastic decision modeling for sustainable pavement designs. *Int J Life Cycle Assess* 2014;19:1185–99. doi:10.1007/s11367-014-0723-4.
- [64] Kucukvar M, Egilmez G, Tatari O. Sustainability assessment of U.S. final consumption and investments: triple-bottom-line input–output analysis. *J Clean Prod* 2014;81:234–43. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.033.
- [65] Egilmez G, Kucukvar M, Tatari O. Sustainability assessment of U.S. manufacturing sectors: an economic input output-based frontier approach. *J Clean Prod* 2013;53:91–102. doi:10.1016/j.jclepro.2013.03.037.
- [66] Tukker A, Dietzenbacher E. Global Multiregional Input–Output Frameworks: An Introduction and Outlook. *Econ Syst Res* 2013;25:1–19.

- doi:10.1080/09535314.2012.761179.
- [67] Lenzen M, Geschke A, Wiedmann T, Lane J, Anderson N, Baynes T, et al. Compiling and using input–output frameworks through collaborative virtual laboratories. *Sci Total Environ* 2014;485:241–51. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.03.062.
- [68] Hoekstra R. A complete database of peer-reviewed articles on environmentally extended input-output analysis. 2010.
- [69] Dietzenbacher E, Lenzen M, Los B, Guan D, Lahr ML, Sancho F, et al. INPUT–OUTPUT ANALYSIS: THE NEXT 25 YEARS. *Econ Syst Res* 2013;1–21. doi:10.1080/09535314.2013.846902.
- [70] Onat NC, Kucukvar M, Halog A, Cloutier S. Systems Thinking for Life Cycle Sustainability Assessment: A Review of Recent Developments, Applications, and Future Perspectives. *Sustain* 2017, Vol 9, Page 706 2017;9:706. doi:10.3390/SU9050706.
- [71] Ewing R, Rong F. The impact of urban form on U.S. residential energy use. *Hous Policy Debate* 2008;19:1–30. doi:10.1080/10511482.2008.9521624.
- [72] Hertwich EG, Peters GP. Carbon Footprint of Nations: A Global, Trade-Linked Analysis. *Environ Sci Technol* 2009;43:6414–20. doi:10.1021/es803496a.
- [73] Dietzenbacher E, Los B, Stehrer R, Timmer M, de Vries G. The Construction of World Input–Output Tables in the WIOD Project. *Econ Syst Res* 2013;25:71–98. doi:10.1080/09535314.2012.761180.
- [74] Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, Geschke A. Building EORA: A Global Multi-Region Input–Output Database at High Country And Sector Resolution. *Econ Syst Res* 2013;25:20–49. doi:10.1080/09535314.2013.769938.
- [75] Tukker A, Poliakov E, Heijungs R, Hawkins T, Neuwahl F, Rueda-Cantucho JM, et al. Towards a global multi-regional environmentally extended input–output database. *Ecol Econ* 2009;68:1928–37. doi:10.1016/j.ecolecon.2008.11.010.
- [76] Kovanda J, Weinzettel J. The importance of raw material equivalents in economy-wide material flow accounting and its policy dimension. *Environ Sci Policy* 2013;29:71–80. doi:10.1016/j.envsci.2013.01.005.
- [77] Steen-Olsen K, Weinzettel J, Cranston G, Ercin AE, Hertwich EG. Carbon, Land, and Water Footprint Accounts for the European Union: Consumption, Production, and Displacements through International Trade. *Environ Sci Technol* 2012;46:10883–91. doi:10.1021/es301949t.
- [78] Andrew RM, Peters GP. A Multi-Region Input–Output Table Based On The Global Trade Analysis Project Database (Gtap-Mrio). *Econ Syst Res* 2013;25:99–121. doi:10.1080/09535314.2012.761953.
- [79] Wiebe KS, Bruckner M, Giljum S, Lutz C. Calculating Energy-Related CO₂ Emissions Embodied In International Trade Using A Global Input–Output Model. *Econ Syst Res* 2012;24:113–39. doi:10.1080/09535314.2011.643293.
- [80] Wiedmann TO, Schandl H, Lenzen M, Moran D, Suh S, West J, et al. The material footprint of nations. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2015;112:6271–6. doi:10.1073/pnas.1220362110.
- [81] Kucukvar M, Cansev B, Egilmez G, Onat NC, Samadi H. Energy-climate-manufacturing nexus: New insights from the regional and global supply chains of manufacturing industries. *Appl Energy* 2016. doi:10.1016/j.apenergy.2016.03.068.
- [82] Kucukvar M, Samadi H. Linking National Food Production to Global Supply Chain Impacts for the Energy-Climate Challenge: The Cases of the EU-27 and Turkey. *J Clean Prod* 2015;108:395–408. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.117.
- [83] WBCSD & WRI. Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard. Geneva, Switzerland: 2011.
- [84] GHG Protocol Initiative. Guidance for Calculating Scope 3 Emissions 2011. [http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/GHG Protocol Guidance for Calculating Scope 3 Emissions - DRAFT August 2011.pdf](http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/tools/GHG%20Protocol%20Guidance%20for%20Calculating%20Scope%203%20Emissions%20-%20DRAFT%20August%202011.pdf).
- [85] Huang YA, Weber CL, Matthews HS. Categorization of Scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting. *Environ Sci Technol* 2009;43:8509–15. doi:10.1021/es901643a.
- [86] Lee K-H. Integrating carbon footprint into

supply chain management: the case of Hyundai Motor Company (HMC) in the automobile industry. *J Clean Prod* 2011;19:1216–23.
doi:10.1016/j.jclepro.2011.03.010.

- [87] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Sera gazlarının izlenmesi ve raporlanması 2014. <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/07/20140722-5.htm>.
- [88] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Enerji verimliliği stratejisi makalesi 2013. http://www.eie.gov.tr/verimlilik/document/Energy_Efficiency_Strategy_Paper.pdf.
- [89] Bakanlığın TCK. 10. Kalkınma Planı: 2014-2018 2013. [http://www.kalkinma.gov.tr/Lists/Yaynlar/Attachments/518/Onuncu Kalkınma Planı.pdf](http://www.kalkinma.gov.tr/Lists/Yaynlar/Attachments/518/Onuncu_Kalkinma_Planı.pdf).
- [90] Foran, B., Lenzen, M., Moran, D., Alsamawi., Geschke, A., Kanemoto, K. Balancing the G20's Global Impact. KGM & Associates. Univ Sydney, Inst Land, Water Soc 2014. <http://apo.org.au/node/42294>.
- [91] Çalışkan, E. T., Aydoğuş O. Türkiye Ekonomisinde Endüstriyel Büyümenin Kaynakları: Girdi-Çıktı Modeli ile Ampirik Bir Analiz (1985-2002). *Ege Akad Bakış* 2011;11:499–510.
- [92] Suh S, Ferrao P, Nhambiu J. *Handbook of Input-Output Economics in Industrial Ecology*. New York: Springer; 2009. doi:10.1007/978-1-4020-5737-3.
- [93] Timmer M, Erumban A, Gouma R. The world input-output database (WIOD): contents, sources and methods. WIOD Work Pap Number 10 2012. <http://www.wiod.org/publications/papers/wiod10.pdf> (accessed November 26, 2014).
- [94] Eurostat. Eurostat manual of supply, use and input-output tables. Luxembourg: 2008.
- [95] United Nations. UN (1999) *Studies in methods: handbook of national accounting*. New York, USA: 1999.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 16.06.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 26.02.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.321957	

Endüstri 4.0 ve akıllı fabrikalar

Aytaç Yıldız*

ÖZ

Modern sanayi gelişimi birkaç yüz yıldır sürmüştür ve günümüze gelinceye kadar üç büyük sanayi devrimi ortaya çıkmıştır. Şu an ise Endüstri 4.0 olarak adlandırılan dördüncü sanayi devrimine girilmiştir. Endüstri 4.0, birbirleriyle haberleşen, sensörlerle ortamı algılayabilen ve veri analizi yaparak ihtiyaçları fark edebilen robotlarla üretimi devralıp; daha kaliteli, daha ucuz, daha hızlı ve daha az israf yapan bir üretim yapmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, Endüstri 4.0, modüler yapıya sahip akıllı fabrikalarda siber fiziksel sistemler ile fiziksel işlemleri izleyerek nesnelerin birbirleriyle ve insanlarla iletişime geçmesine izin verir ve bunun sonucu olarak merkezi olmayan işbirlikçi kararların verilmesini sağlar. Günümüzdeki rekabet ortamında işletmelerin varlıklarını koruyabilmeleri ve sürdürebilmeleri için Endüstri 4.0'ı organizasyonlarına uygulaması kaçınılmaz olmuştur. Bunun için de Endüstri 4.0 kavramının ve temel olan paradigmalarının çok iyi bilinmesi gerekmektedir. Bundan dolayı bu çalışmada, Endüstri 4.0 ve temel paradigmaları açıklanmış, akıllı fabrikalar hakkında bilgi verilerek genel bir değerlendirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: endüstri 4.0, akıllı fabrika, nesnelerin interneti, siber-fiziksel sistemler

Industry 4.0 and smart factories

ABSTRACT

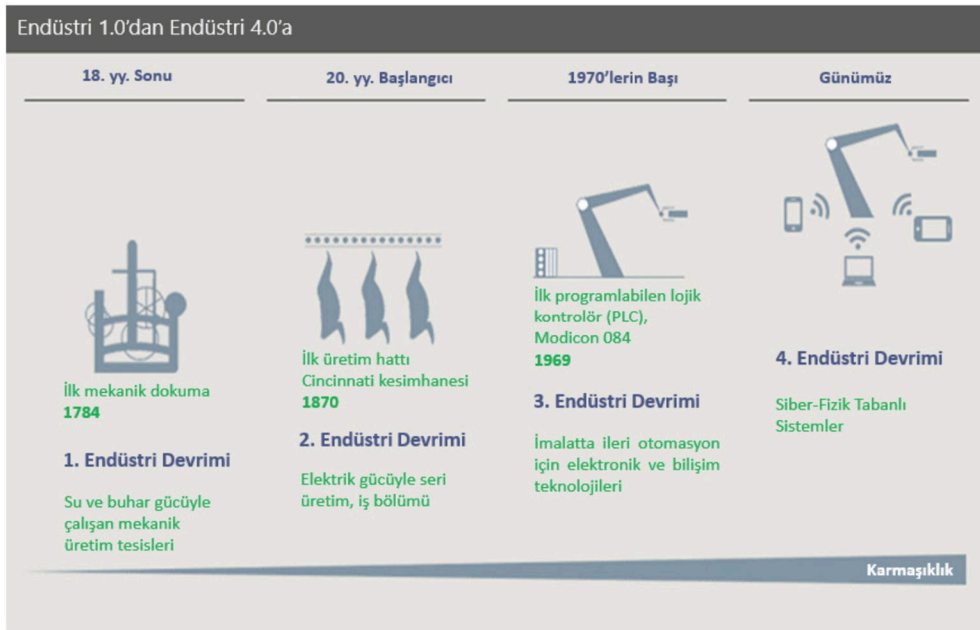
Modern industrial development lasted for several centuries, and three major industrial revolutions had emerged until daylight. It is now entering the fourth industrial revolution, called industry 4.0. Industry 4.0 aims to make that production with better quality, cheaper, faster and less waste with robots that communicate with each other, can sense the environment with sensors, and realize the needs by making data analysis. It allows to communicate with each other and people of things by monitoring physical processes with cyber-physical systems in modular smart factories and as a consequence decentralized collaborator decisions are made. In today's competitive environment, it has become inevitable for businesses to apply Industry 4.0 to their organizations in order to protect and sustain their presence. For this, it must be well known the concept of Industry 4.0 and its basic paradigms. Therefore, in this study, the industry 4.0 and its basic paradigms are explained, and a general evaluation is made by giving information about smart factories.

Keywords: Industry 4.0, smart factory, internet of things, cyber-physical systems

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçinde bulunduğumuz döneme gelinceye kadar üç adet büyük sanayi devrimi gerçekleşmiştir [1]. Endüstriyel anlamda ilk olarak 18. yüzyılda buhar makineleri ile başlayan ve üretimin artırılması yönünde olan Birinci Sanayi Devrimini (Endüstri 1.0), 20. yüzyılın başında seri üretime geçiş olarak ortaya çıkan ve elektrik enerjisinden faydalanmanın önünü açan İkinci Endüstri Devrimi (Endüstri 2.0) takip etmiştir. Daha sonra ise, üretim sistemlerinin analog olmaktan çıktığı ve dijital sistemlerin sanayide yer aldığı Üçüncü Endüstri Devrimi (Endüstri 3.0) ortaya çıkmıştır [1, 2-4]. Böylelikle, ilk üç sanayi devrimi, insan üretimine mekanizasyon, elektrik ve bilgi teknolojilerini (IT) getirmiştir [5]. Gerçekleşen bu üç sanayi devrimi üretimde verimliliğin artırılmasına yönelik olmuştur [1]. Ancak dünyadaki üretim şirketleri o dönemlerde yaşanan çevresel, toplumsal, ekonomik ve teknolojik

gelişmelere bağlı olarak çok ciddi zorluklarla karşı karşıya kalmış ve sadece verimliliği artırmak küresel rekabette şirketleri ön plana çıkarmamıştır. Şirketler, bu zorlukların üstesinden gelmek için, inovasyondan üretim ve dağıtıma kadar tüm yaşam döngüsü boyunca yakın işbirliği ve hızlı adaptasyona izin veren sanal ve fiziksel yapılar ihtiyacı duymuş ve sürekli olarak bir arayış içerisine girmişlerdir [6]. Soğuk savaş sonrası ülkeler arasındaki ticari sınırlar ortadan kalkmış ve bu ülkeler arasında alışverişler artmaya başlamıştır. 1960'lı yıllarda sadece var olan ürünü satınalan müşterinin 2000'li yıllara gelindiğinde istek ve beklentilerinin değişmesi firmaların üretim proseslerinin daha karmaşık olmasına neden olmuştur [2]. Böylelikle firmalar artık disiplinlerarası çalışma ihtiyacı duymuş ve internet üzerinden tüm nesnelerin iletişim ve etkileşim içinde bulunduğu Dördüncü Endüstri Devrimi (Endüstri 4.0) ortaya çıkmıştır [2, 4]. Ortaya çıkan bu endüstri devrimlerinin gelişimi Şekil 1'de gösterilmektedir [1].



Şekil 1. Endüstri devrimleri (Industry revolutions) [1]

İlk sanayi devriminden bu yana, müteakip devrimler, su ve buharlı elektrikli makinelerden elektrikli ve dijital otomatikleştirilmiş üretimlere kadar üretimde radikal değişiklikler oluşturmuştur. Üretim süreçleri giderek daha karmaşık, otomatik ve sürdürülebilir hale gelmiştir. Bu da, makinelerin basit, verimli ve kararlı çalışması ihtiyacını ortaya çıkarmıştır [3-5]. Diğer yandan bilgi ve iletişim teknolojilerinin sürekli olarak gelişmesi de imalat şirketlerine

ihtiyaçlarını gidermek adına büyük potansiyel sunmaya devam etmiştir [7]. Buna bağlı olarak "2011 Hannover Fuarı" etkinliği sırasında Almanlar tarafından yeni bir kavram olan ve 4. endüstriyel devrimin başlangıcını simgeleyen Endüstri 4.0 tanımlanmıştır [3-5]. Ayrıca aynı yıl Alman hükümetinin stratejik bir inisiyatifi haline gelmiş ve Yüksek Teknoloji Stratejisi 2020 Eylem Planı'na dahil edilmiştir. Böylece, Endüstri 4.0 kavramı, gelecekte rekabet edebilmek için bir

strateji olarak görülmüştür [8]. Benzer endüstri ülkelerinde de benzer stratejiler önerilmiştir. Örneğin; Avrupa düzeyinde, buna tekabül eden kavram, “Geleceğin Fabrikaları”, ABD’de “Endüstriyel İnternet” ve Çin’de “İnternet +” dir. O zamandan beri, “akıllı imalat”, “endüstriyel internet” ya da “entegre sanayi” olarak da bilinen Dördüncü Sanayi Devrimi olarak anılan endüstri 4.0 terimi dünyadaki endüstriler ve akademisyenler arasında en popüler imalat konularından biri olmuş ve şu anda tüm sektörleri etkileyebilecek potansiyele sahip olduğu varsayılan bir konudur [5, 9]. 4. Endüstri Devrimi, sanayide, genel olarak makinelerin insan gücüne gerek kalmaksızın kendilerini ve üretim süreçlerini yönetmeye başlamalarıyla ortaya çıkmıştır [10]. Endüstri 4.0 başlangıçta bir teknoloji denemesi olarak düşünülürken, şimdi sürekli değişen bir endüstri ortamında rekabet gücünü korumak için bir gereklilik olmuştur [9]. Çünkü endüstri 4.0 sayesinde daha çok bilgisayarlaşmanın ve daha çok yazılımın karar verme süreçleri ve akıllı sistemlerin üretimde yer alması beklenmektedir [1, 21].

2. ENDÜSTRİ 4.0 (INDUSTRY 4.0)

Endüstri 4.0 olarak adlandırılan yeni süreç, üretim ve tüketim ilişkilerini bütünüyle değiştirecek bir yapı içermektedir. Bir yanda tüketicinin değişen ihtiyacına anlık olarak uyum sağlayan üretim sistemlerini, diğer yanda ise birbirleriyle sürekli iletişim ve koordinasyon halinde olan otomasyon sistemlerini tanımlamaktadır [11] ve ürün geliştirmede çeşitli disiplinler arasındaki yakın işbirliğini teşvik etmektedir [12].

Mrugalska ve Wyrwicka (2017) endüstri 4.0 kavramını, “karmaşık fiziksel makine ve cihazların, ticari ve toplumsal sonuçları daha iyi tahmin etmek, kontrol etmek ve planlamak için kullanılan ağa bağlı sensörler ve yazılımlarla entegrasyonu” veya “ürünlerin yaşam döngüsü boyunca yeni bir değer zinciri organizasyonu ve yönetimi seviyesi” olarak tanımlamaktadırlar. Endüstri 4.0, özerk kontrolü ve dinamik üretimi nedeniyle değer zincirlerinin optimizasyonu üzerinde yoğunlaşmıştır. Rekabetçi ürünlerin, hizmetlerin, güçlü ve esnek lojistik ve üretim sistemlerinin tasarımını ve uygulanmasını kapsamaktadır [8]. Can ve Kıymaz (2016) Endüstri 4.0’ın üretimle direkt yada dolaylı olarak ilişkili olan bütün birimlerin birbiri ile ortak çalışmasını planladığını, dijital verilerin, yazılımın

ve bilişim teknolojilerinin birbiri ile entegre olarak çalışmasını öngördüğünü söylemektedirler [1]. Batista ve ark. (2017) endüstri 4.0’ın imalat sanayiinde, sensör ve aktüatör alt yapılarında yeralan tüm değer zinciri sürecinin organizasyonu ve yönetimindeki ileri bir gelişim aşaması olduğunu söylemektedirler [13]. Qin ve ark. (2016)’a göre endüstri 4.0, çeşitli şirketler, fabrikalar, tedarikçiler, lojistik, kaynaklar, müşteriler vb. arasında var olacak komple bir iletişim ağı anlamına gelmektedir. Burada her bölüm, ağdaki ilgili bölümlerin talep ve durumuna bağlı olarak gerçek zamanlı olarak yapılandırılmalarını optimize etmektedir. Başka bir deyişle, gelecekteki iş ağı, kendi kendini organize eden bir statüye ulaşabilen ve gerçek zamanlı cevapları iletebilen her bir işbirliği bölümü tarafından etkilenmektedir [5]. Schumacher ve ark. (2016) ise endüstri 4.0’ın internetin ve destek teknolojilerinin (örn. gömülü sistemler) fiziksel nesnelere, insan oyuncularını, akıllı makineleri, üretim hatlarını ve süreçleri örgütsel sınırlar boyunca entegre etmelerinin omurgasını oluşturduğu yeni teknolojik gelişmeler olduğunu bildirmektedirler [6].

Endüstri 4.0 kavramı gelecekte rekabetçi ortamda ayakta kalmak için önemli bir strateji olarak görülmektedir. Buna, rekabetçi ürünlerin ve hizmetlerin tasarımı ve uygulanmasının yanı sıra esnek lojistik ve üretim sistemleri de dâhildir. Endüstriyel şirketler şu anda ürünlerin bireyselleştirilmesinin artması, kaynak verimliliğinin artırılması ve pazara girme süresinin kısaltılması gibi zorlukların üstesinden gelmek için endüstri 4.0 terimi üzerinde durmaktadırlar [14].

Endüstri 4.0, kendiliğinden yapılandırma, kendi kendini denetleme ve kendini iyileştirme gibi otonomik özelliklere sahip akıllı sistemler tarafından yönlendirilen imalat ekosistemlerini sağlayacaktır. Böylelikle, makine-insan işbirliğine ve simbiyotik ürün gerçekleştirimine dönük yeni tip ileri üretim ve endüstriyel süreçler ortaya çıkacaktır. Bunun sonucu olarak da eşi benzeri görülmemiş düzeyde operasyonel verimlilik elde etmemize ve verimliliğimizi hızlandırmamıza izin verecektir [15].

Endüstri 4.0’da, üretimde üretilen akıllı ürün diye tabir edilen yeni bir ürün türü ortaya çıkmaktadır. Bu ürünler, müşterilere fonksiyonel rehberliği iletmek için bilgi taşıyan ve üretim sistemine geribildirim sağlayan sensörler, tanımlanabilir bileşenler ve işlemcilerle gömülüdür [5]. Akıllı

bağlantılı ürünler, yeni işlevsellik, çok daha fazla güvenilirlik, çok daha yüksek ürün kullanımı ve geleneksel ürün sınırlarını aşan ve öne çıkabilen yetenekler için katlanarak genişleyen fırsatlar sunmaktadır [16]. Bu ürünlere, ürünlerin veya kullanıcıların durumunun ölçülmesi, bu bilginin taşınması, ürünlerin izlenmesi ve sonuçlara göre analiz edilmesi gibi birçok fonksiyon eklenebilir. Endüstri 4.0 altında yeni bir satınalma yöntemi sağlanarak müşterilere de birçok avantajlar sunulmaktadır. Örneğin onların fikirleri üretim sırasında herhangi bir zamanda alınabilir veya siparişlerini son dakikada bile olsa ücretsiz olarak değiştirebilirler. Öte yandan, akıllı ürünlerle müşterinin sadece ürünün üretim bilgisini bilmesine değil, aynı zamanda kendi davranışlarına bağlı olarak kullanım tavsiyesi almasına da olanak tanınmaktadır [5].

Endüstri 4.0'ın hedefleri; bilgi teknolojilerinin ürettiği ürünlerin toplu olarak özelleştirilmesini sağlamak, üretim zincirinin otomatik ve esnek uyumunu sağlamak, parçaları ve ürünleri izlemek, parçalar, ürünler ve makineler arasındaki iletişimi kolaylaştırmak, insan-makine etkileşimi (HMI) paradigmasını uygulamak, akıllı fabrikalarda nesnelerin interneti özellikli üretim optimizasyonunu sağlamak ve değer bakımından yeni tür hizmetler ve iş modelleri sunmak olarak sıralanabilir [4].

Endüstri 4.0 sisteminin karmaşıklığının giderek büyümesine rağmen aşağıda özetlenen potansiyellere de sahiptir [8]:

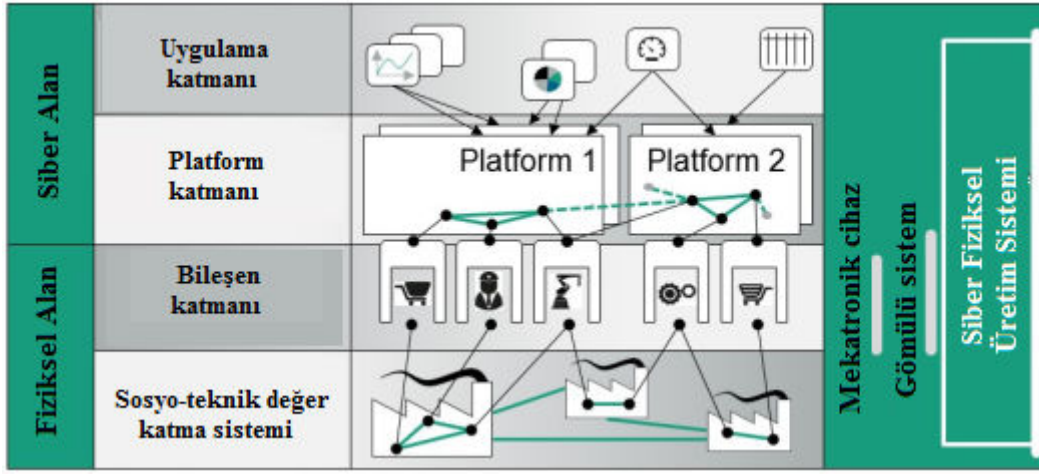
- İş süreçlerinin dinamik yapısından kaynaklanan rekabet ve esnekliği artırma (kalite, zaman, risk, sağlamlık, fiyat ve çevre dostu),
- Talep zincirindeki arızaları ortadan kaldırma,
- Gerçek zamanlı uçtan uca görünürlük sayesinde karar vermeyi optimize etme,
- Artan kaynak üretkenliği (belirli bir kaynak hacminden en yüksek çıktıyı sağlayan) ve verimlilik (belirli bir çıktı elde etmek için mümkün olan en düşük miktarda kaynak kullanıyor) sağlama,

- Değer fırsatları (yenilikçi hizmetler, yeni istihdam biçimleri, KOBİ'lerin ve yeni teşebbüslerin gelişme imkânı) oluşturma,
- Enerji ve kişisel maliyetleri düşürme.

Endüstri 4.0, sayısız teknolojiyi ve ilişkili paradigmalardan bazılarını, Radyo Frekansı Tanımlama (Radio Frequency Identification-RFID), Kurumsal Kaynak Planlaması (Enterprise Resource Planning-ERP), Nesnelerin İnterneti (Internet of Things-IoT), Nesnelerin Endüstriyel İnternet'i (Industrial Internet of Things-IIoT), Siber-Fiziksel Sistemler (Cyber-Physical Systems- CPS), bulut tabanlı imalat (Cloud Based Manufacturing-CBM), akıllı fabrika, akıllı ürün vb., olarak sıralanabilir [4, 6,15]. Bu özellikler yalnızca internet teknolojileri ve gelişmiş algoritmalarla yüksek derecede ilişkili değil, aynı zamanda Endüstri 4.0'ın katma değerli bir bilgi işleme ve endüstriyel katma değerli bir süreç olduğuna işaret etmektedir [4]. Aşağıda bu paradigmalardan bazıları kısaca özetlenmiştir.

2.1. Siber-Fiziksel Sistemler (Cyber-Physical Systems)

Fiziksel dünya ile siber dünya arasındaki iletişim ve koordinasyonu içeren yapıların bütünü Siber-Fiziksel Sistemler (CPS) olarak adlandırılmaktadır [11]. CPS'nin başlıca rolü, üretimin çevik ve dinamik gereksinimlerini yerine getirmek ve tüm sanayinin etkinliğini ve verimliliğini arttırmaktır [4]. Endüstri 4.0, internetin ve CPS olarak adlandırılan ve fiziksel ve sanal dünyayı bir araya getiren sistemler olarak kabul edilebilen benzeri görülmemiş bir bağlantı ile karakterize edilir. Daha doğrusu, "siber-fiziksel sistemler fiziksel süreçlerle hesaplamaların bütünleştirilmesidir. Bu, üretim sürecinde kontrol, gözetim, şeffaflık ve verimliliğin tamamen yeni bir derecesini sağlamaktadır. CPS, Şekil 2'de gösterildiği gibi ağların birden fazla sensör, aktuatör, kontrol işlem birimi ve iletişim cihazı kullanılarak entegrasyonunu gerçekleştirmektedir [16].



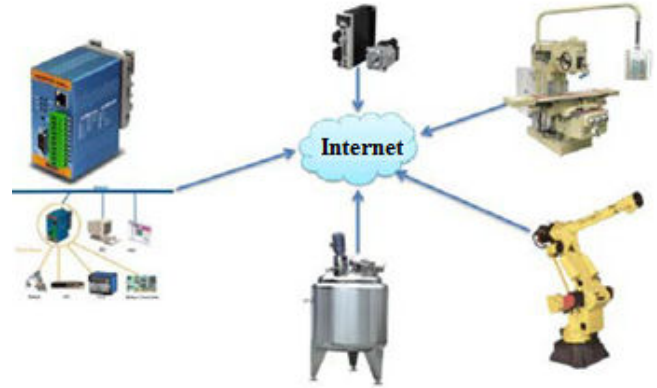
Şekil 2. Siber-fiziksel üretim sistemleri (Cyber-physical production systems-CPPS) [17]

2.2. Nesnelerin İnterneti (Internet of Things)

Nesnelerin birbiriyle iletişimini olanaklı kılan yapılara Nesnelerin İnterneti (IoT) adı verilmektedir [11]. Nesnelerin interneti'nin çok sayıda ekonomik fırsat açması beklenmekte ve büyük bir yıkıcı potansiyele sahip en umut verici teknolojilerden biri olarak kabul edilmektedir [16]. Nesnelerin interneti kavramı bir İngiliz girişimci Kevin Ashton tarafından oluşturulmuştur. Fikir, maddi dünyanın bilgisayarlarla (veri alış verişi) her yerde bulunan sensörlerle iletişim kurduğu bir sistemi tanımlamak için 1999'da formüle edilmiştir. Bu yaklaşımda, yalnızca nesnelerin değil, aynı zamanda süreçler, veriler, insanlar ve hatta hayvanlar ya da atmosferik olgular - bir değişken olarak ele alınarak her şeyden bir sistem oluşturulmuştur [3]. 21. yüzyılın ilk on yılında "nesnelerin interneti" terimi popüler hale gelmiş ve tedarik zincirindeki ürün ve süreçlere bilgi ekleyerek endüstrilerin Endüstri 3.0'dan Endüstri 4.0'a geçmesini sağlayan bir teknoloji olarak düşünülmüştür [9, 16]. Teknik açıdan bakılırsa, IoT, internet tabanlı iletişim ve veri değiş tokuşunu sağlayan elektrik, mekanik, bilgisayar ve iletişim mekanizmalarının gömülü sistemlerini içeren fiziksel eserler topluluğudur.

IoT, bilgi işlem ve iletişim teknolojilerini evde ve işyerimizde kullandığımız birçok "şey"e entegre etmeye başladığımızda başlayan bir hareketi yakalayan soyut bir fikirdir. Radyo frekansı tanımlama (RFID) cihazları gibi düşük maliyetli sensör teknolojileri ile "nesneleri" etiketleme ve izleme fikri ile başlamıştır. Bununla birlikte, paradigma, piyasanın düşük maliyetli bilgi işlem ve internet tabanlı iletişim teknolojilerini her yerde bulunan akıllı telefonun yükselişiyle birlikte sunmaya başlamasıyla birlikte değişmiştir. Düşük

maliyetli bilgi işlem ve yaygın geniş bant ağının mükemmel bir fırtınası IoT'nin gelişmesine izin vermiştir. Endüstriyel IoT'nin bazı örnekleri Şekil 3'te gösterildiği gibi; sensörler, aktuatörler, robotlar, freze makineleri, 3D yazıcılar ve montaj hattı bileşenleri, kimyasal karıştırma tankları, motorlar, insülin ve infüzyon pompaları, sağlık cihazları hatta uçaklar, trenler ve otomobiller gibi çok geniş bir yelpazede cihazları içermektedir [15].

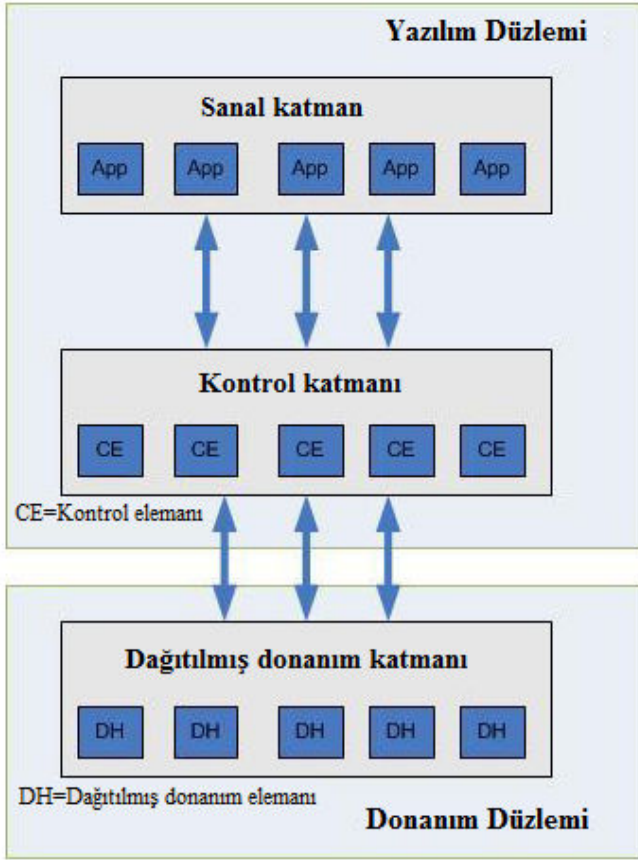


Şekil 3. Nesnelerin interneti (Internet of Things) [15]

2.3. Bulut Tabanlı İmalat (Cloud Based Manufacturing)

Bulut tabanlı imalat (CBM), Endüstri 4.0'ın başarısına önemli katkı sağlayacak bir diğer yükselen paradigmadır. CBM, müşteri tarafından oluşturulan değişken talebe yanıt vermek için verimliliği artıran, ürün ömrü maliyetlerini düşüren ve optimum kaynak tahsisine izin veren, geçici, yeniden yapılandırılabilir siber-fiziksel üretim hatları oluşturmak için paylaşılan çeşitlendirilmiş ve dağıtılan üretim kaynaklarının bir paylaşım kümesine talep üzerine erişimden yararlanan bir ağa bağlı üretim modeli olarak tanımlanabilir. CBM'nin özellikleri, ağa bağlı üretim, ölçeklenebilirlik, çeviklik, her yerde

erişilebilirlik ve sanallaştırma, büyük veriler ve IoT, hizmet için her şey ve kaynak havuzunu içermektedir. Şekil 4’te basitleştirilmiş yazılım tanımlı bulut üretim mimarisi yer almaktadır.



Şekil 4. Basitleştirilmiş yazılım tanımlı bulut üretim mimarisi (Simplified software-defined cloud production architecture) [15]

Şekil 4’teki donanım düzlemi nihai işi yaparken yazılım düzlemi işin tamamlanıncaya kadar nasıl düzenleneceğini tanımlar. Donanım düzleminde dağıtılmış donanım katmanı bulunur. Bu katman, ayrıca 3 boyutlu yazıcı gibi dağıtılmış donanım elemanlarından oluşur. Yazılım düzlemi sanal ve kontrol katmanları olmak üzere iki katman içerir. Kontrol katmanı, kontrol elemanlarından oluşur ve sanal katman, son kullanıcı uygulamalarını içerir. Bilgi akışları oklarla gösterilir. Dağıtılmış donanım katmanı, kontrol katmanı ile karşılıklı olarak iletişim kurar. Aynı şekilde, sanal katman kontrol katmanı ile arabirim oluşturur [15].

3. AKILLI FABRIKALAR (SMART FACTORIES)

Dünyanın önde gelen sanayileşmiş ülkelerinin çoğu, küreselleşen dünyada ileri üretim, yenilik ve tasarımı teşvik etmek için ulusal girişimlere yatırım yapmıştır. Bu yatırımın büyük kısmı, Endüstri 4.0 gibi akıllı fabrikaların ve akıllı imalatın norm olduğu bir geleceğe ulaşmak için

olmuştur [4]. Endüstri 4.0; yapay zeka, 3D (üç boyutlu) yazıcılar ve uzay teknolojisi gibi alanlarda meydana gelen ilerlemelerle birlikte bütün nesnelerin internet aracılığıyla birbirleriyle etkileşime geçebileceği “akıllı üretim” (smart manufacturing) olarak adlandırılmaktadır. Endüstri 4.0’da nesnelerin birbirleriyle haberleştiği önemli yerlerden biri de “akıllı” teknolojilerle donatılmış ve hiçbir insanın çalışmaması nedeniyle karanlık fabrikalar olarak da adlandırılan “akıllı fabrikalardır”. Çin’de gerçekleştirilen ve cep telefonu modülü üreten ilk karanlık fabrikada robotların kullanılmasıyla işçi sayısı % 90 azalırken kusurlu ürünlerin oluşma oranı % 25’den % 5’e kadar düşmüştür [18].

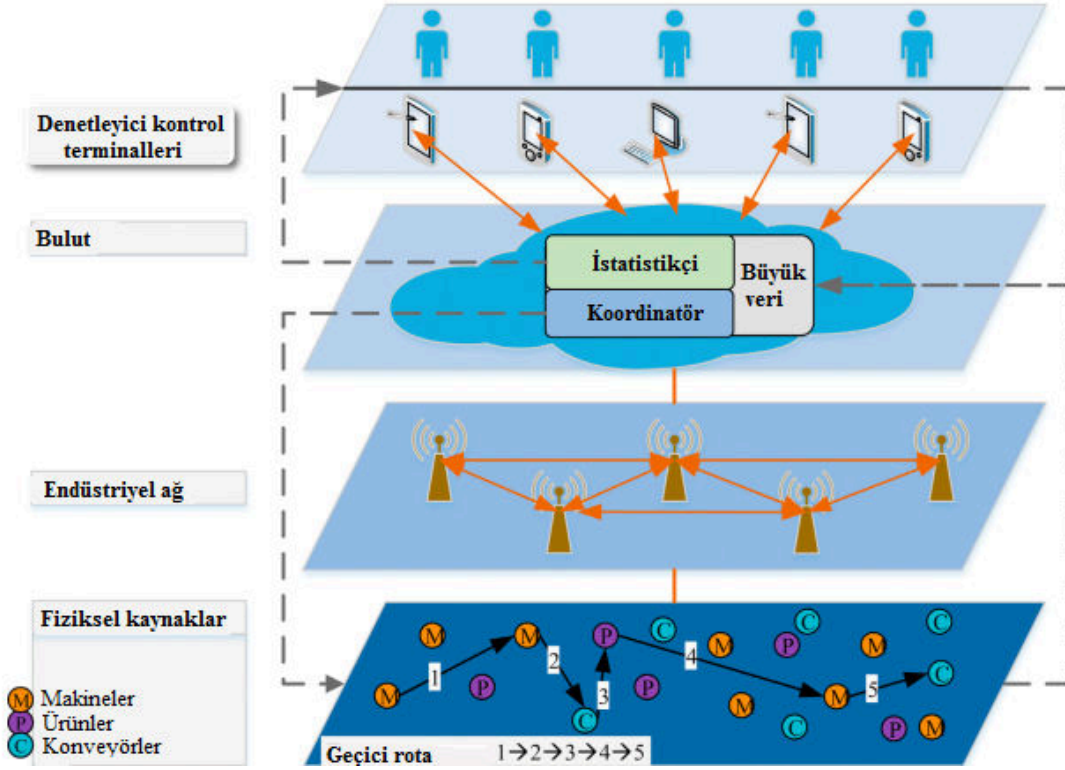
Şimdiye kadar, CPS, IoT ve CBM Endüstri 4.0’ın temel bileşenleri olarak tanıtıldı. CPS, IoT üzerinden iletişim kurduğundan bu kavramların birbiriyle yakından ilişkili olduğuna dikkat edilmelidir. Bu nedenle, insanların, makinelerin ve kaynakların birbirleriyle doğal olarak sosyal bir ağda iletişim kurduğu merkezi olmayan bir üretim sistemi fikrine dayanan “akıllı fabrika” diye isimlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Ürünler, makine, nakliye sistemleri ve insanlar arasındaki yakın bağlantının ve iletişimin mevcut üretim mantığını değiştirmesi beklenmektedir. Bu nedenle akıllı fabrikalar, Endüstri 4.0’ın bir başka önemli özelliği olarak görülmektedir. Akıllı fabrikada, ürünler üretim süreçleri boyunca kendi yollarını bağımsız olarak bulur ve her zaman kolaylıkla tanımlanabilir ve bulunabilir niteliktedirler. Akıllı fabrikalar üretim süreçlerinin artan karmaşıklığını, orada çalışan insanlar için yönetilebilir hale getirerek ve üretimin aynı anda çekici, kentsel çevrede sürdürülebilir ve karlı olmasını sağlamaktadır [16].

Endüstri 4.0’ın “Akıllı Fabrikaları” iş ihtiyacını sensörlerle algılayıp, uzaktaki diğer üretim araçları ile internet vasıtasıyla iletişim kurup, ihtiyaç duydukları üretim bilgisini bulut sistemler içerisindeki “Büyük Veriden” (Big Data) çeken akıllı makineler ve sistemleri içermektedir. Burada, üretim araçlarının birbirleriyle kurdukları iletişim ve etkileşim internet aracılığıyla sağlanmaktadır [11]. Burada tüm üretim kaynakları (sensörler, aktüatörler, makineler, robotlar, konveyörler, vb.) sadece otomatik olarak bilgi alışverişinde bulunmayacak aynı zamanda üretim sürecini kontrol etmek ve fabrika sistemini yönetmek için makineleri öngörmek ve bakım yapacak kadar bilinçli ve akıllı olacaklardır. Buna ek olarak, ürün tasarımı, üretim planlaması, üretim

mühendisliği, üretim ve servisler gibi pek çok üretim süreci, modüler olarak simüle edilecektir. Ayrıca, bu süreçler sadece bir merkezileştirilmemiş sistem tarafından komuta edilmeyecek aynı zamanda birbirine bağımlı bir şekilde kontrol edildiği anlamına gelen uçtan uca sistemiyle birbirine bağlanacaktır [5].

Akıllı fabrika, akıllı üretim için ağ üretim sistemlerinin dikey entegrasyonunu ifade eden endüstri 4.0'ın önemli bir özelliğidir. Akıllı fabrika uygulanması için, akıllı fabrikalar akıllı nesnelere büyük veri analizi ile birleştirmelidir.

Akıllı nesnelere, yüksek esnekliği sağlamak için dinamik olarak yeniden yapılandırılabilirken büyük veri analizi, yüksek verim elde etmek için küresel geribildirim ve koordinasyon sağlayabilir. Bu nedenle akıllı fabrika, özelleştirilmiş ve küçük miktarda ürünleri verimli ve karlı bir şekilde üretebilir. Akıllı fabrika, Şekil 5'te gösterildiği gibi çift kapalı çevrimli bir sistem olarak görülebilir. Bir döngü fiziksel kaynaklardan ve buluttan oluşurken, diğer döngüler denetleyici kontrol terminallerinden ve buluttan oluşmaktadır [19].



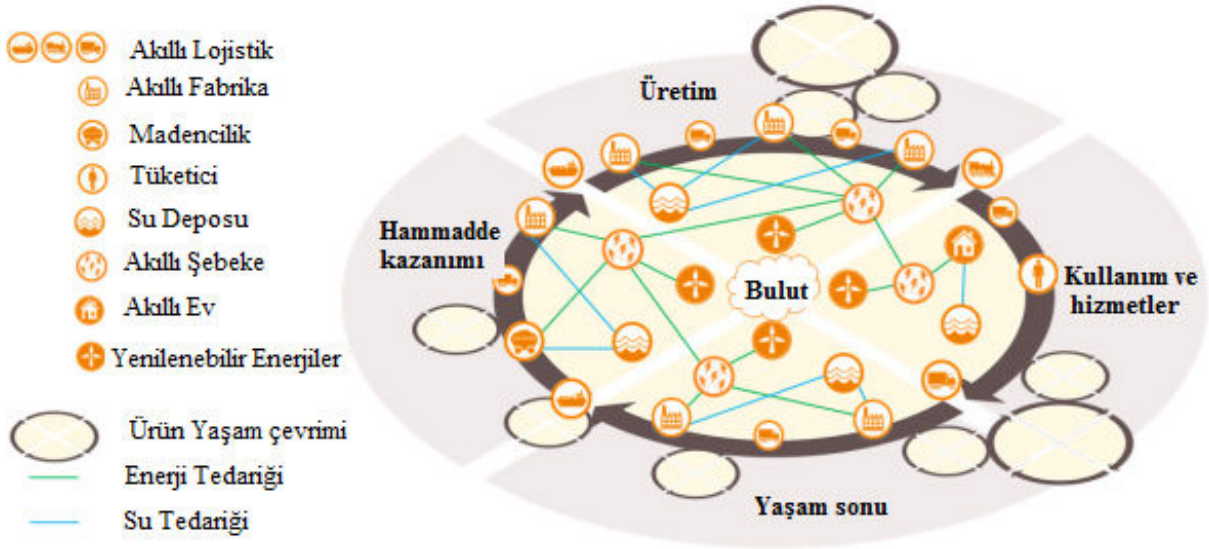
Şekil 5. Endüstri 4.0 akıllı fabrika çerçevesi (Industry 4.0 smart factory framework) [19]

Endüstri 4.0 paradigması esas olarak üç boyutlu ana hatlarıyla belirtilmektedir: (1) tüm değer yaratma ağı boyunca yatay entegrasyon, (2) ürün ömrü boyunca uçtan uca mühendislik ve (3) dikey entegrasyon ve ağa dayalı üretim sistemleri. Tüm değer yaratma ağındaki yatay entegrasyon, ürün ömrünün değer zincirinde ve bitişik ürün yaşam döngülerinin değer zincirleri boyunca değer yaratma modüllerinin çapraz şirket içi ve şirket içi akıllı çapraz bağlamasını ve sayısallaştırılmasını tanımlamaktadır. Ürün yaşam döngüsü boyunca uçtan uca mühendislik, bir ürün yaşam döngüsünün hammadde alımından imalat sistemine, ürün kullanımına ve ürün ömrüne kadar tüm safhalarında akıllı çapraz bağlama ve sayısallaştırmayı (dijital) tanımlar. Dikey entegrasyon ve ağa bağlı üretim sistemleri, imalat istasyonlarından üretim hücrelerine, hatlara ve fabrikalardan bir değer yaratma modülünün farklı

toplama ve hiyerarşik seviyelerindeki akıllı çapraz bağlamayı ve sayısallaştırmayı tanımlamaktadır. Akıllı çapraz bağlama ve sayısallaştırma, bir bulutta gömülü olan bilgi ve iletişim teknolojilerini kullanarak uçtan-uca bir çözümün uygulanmasını kapsamaktadır. Bir imalat sisteminde akıllı çapraz bağlama, kendi kendini organize ve merkezi olmayan bir şekilde çalışan CPS uygulanmasıyla gerçekleşmektedir. Gömülü mekatronik bileşenler, yani veri toplanması için uygulanan sensör sistemleri ve fiziksel işlemleri etkilemek için aktüatör sistemleri üzerine kurulmuştur.

Şekil 6'da gösterildiği gibi Endüstri 4.0'ın makro perspektifi, Endüstri 4.0'ın uçtan uca mühendislik boyutunun yanı sıra yatay entegrasyonu da kapsar. Bu görselleştirme, çapraz bağlantılı ürün yaşam döngülerini, Endüstri 4.0'daki değer yaratma

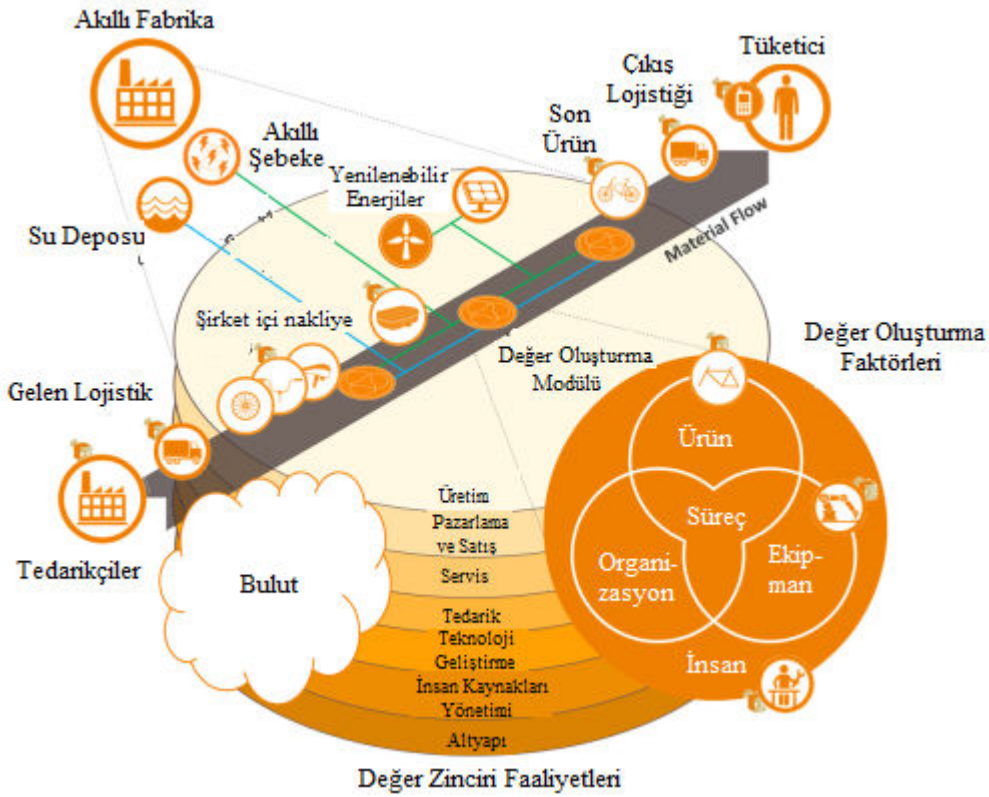
ağlarının merkezi unsuru olarak koyarak güçlü bir ürün ömrü döngüsü ile ilgili bakış açısına dayanmaktadır.



Şekil 6. Endüstri 4.0'ın makro perspektifi (Macro perspective of Industry 4.0) [20]

Şekil 7'de sunulan Endüstri 4.0'ın mikro perspektifi esasen yatay entegrasyonu ve akıllı fabrikalar içindeki dikey entegrasyonu

kapsamakla birlikte, uçtan uca mühendislik boyutunun bir parçasıdır.



Şekil 7. Endüstri 4.0'ın mikro perspektifi (Micro perspective of Industry 4.0) [20]

En yüksek toplama düzeyinde değer yaratma modülü olan akıllı fabrika, imalat hatları, üretim hücreleri veya üretim istasyonları gibi daha düşük toplama seviyelerinde farklı değer yaratma

modülleri içermektedir. Akıllı fabrikalar, harici akıllı şebeke tarafından sağlanan tedarik yanısıra, kendiliğinden yeterli bir tedarik parçası olarak yenilenebilir enerjileri kullanacaklar.

Böylece fabrika, aynı zamanda bir enerji tedarikçisi ve tüketicisi haline gelecektir. Akıllı şebekenin yanı sıra akıllı fabrikanın enerji yönetim sistemi, enerji arzının ve geribildiriminin dinamik gereksinimlerini karşılayabilmelidir. Akıllı fabrika içerisindeki değer yaratma modülleri için temiz su temini, aynı zamanda yeterli ve bozulmamış bir su deposu gerektiren önemli bir kaynak akışıdır. Mikro perspektiften yatay entegrasyon akıllı lojistik, entegre akıllı fabrika malzeme akışı boyunca çapraz bağlı değer yaratma modülleri ile karakterizedir. Akıllı lojistikte fabrikalardan fabrikalara gelen ve giden lojistik, trafikte veya havada meydana gelen değişiklikler gibi öngörülemeyen olaylara karşı tepki gösterebilen ve başlangıçtan başlayarak otonom bir biçimde çalışabilen ulaşım araçları ile karakterize edilmektedir [20].

Endüstri 4.0 anlamında üretim teknolojilerinin ve iş modellerinin teknolojik ilerlemesinin gerekliliği konusunda ortak bir mutabakat olmasına rağmen, algılanan karmaşıklık ve soyutluk, endüstriyel uygulamaya hızlı dönüşümü kısmen engelleyen büyük bir engel oluşturmaktadır. Zorluklar, yeni teknolojilerin edinilmesi için gerekli olan finansal yatırımla sınırlı değil, aynı zamanda gelecekteki üretim sistemlerinin artan karmaşıklığıyla baş edebilecek nitelikte personelin tüm organizasyon seviyelerinde bulunması ile ilgilidir. Öğrenme fabrikalarının, öğrencilerin ve profesyonellerin Bununla birlikte, Endüstri 4.0 anlamında gelecek üretim senaryoları için, öğrenen fabrikaların yöneticileri ve çalışanlarının gittikçe dijitalleşen bir üretim sisteminin zorluklarıyla başa çıkmasına olanak tanıyan diğer yetkinlikleri de ele alınmalıdır [21]. Üretim yönetimi prensiplerinin uygulanması konusunda eğitilmesi için vazgeçilmez bir araç olduğu kanıtlanmıştır [21]. Bu nedenle, öğrenen fabrikalar eğitimler için ve Endüstri 4.0 kullanımına yönelik çalışanların hazırlanması için büyük bir fırsat sunmaktadır [7].

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (CONCLUSION AND EVALUATION)

Sanayileşmiş ülkelerde, sanayileşme değeri yaratılması şu an sanayileşmenin dördüncü aşaması olan Endüstri 4.0 olarak adlandırılan gelişme ile şekillenmektedir. Bu gelişme, 1970'lerin başında başlayan ve üretimde yüksek düzeyde bir otomasyon gerçekleştirmek için elektronik ve bilgi teknolojilerine dayanan üçüncü endüstriyel devrimi izlemektedir.

Endüstri 4.0'a yönelik gelişme şu anda imalat sanayii üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve gelecekte bu etki katlanarak devam edecektir. Çünkü Endüstri 4.0 gelecekte makine-insan işbirliğine ve simbiyotik ürün gerçekleştirmesine dönük yeni tip ileri üretim ve endüstriyel süreçler ortaya çıkararak eşi benzeri görülmemiş düzeyde operasyonel verimlilik elde etmemizi sağlayacak ve verimliliğimizi hızlandırmamıza izin verecektir. Diğer bir deyişle, "dijital dönüşüm" ve Endüstri 4.0 ile beraber ulaşılabilecek yeni seviyede insanların, nesnelere ve sistemlerin birbiriyle bağlantısı yaygın ve etkin bir şekilde gerçekleştirilmiş olacaktır. Bu yüzden gelecekte rekabet gücünü arttırmak isteyen şirketler üretim organizasyonlarına Endüstri 4.0 devrimini uygulamaları ve bunun sonucu olarak da fabrikalarında akıllı robotlar, siber-fiziksel sistemler, bulut tabanlı imalat gibi teknolojilere başvurmaları gerekmektedir.

Bundan dolayı 4. Endüstri devriminde gelişmiş birçok ülke temellerini atmış ve bu temellerin devamı için güçlü adımlar attıklarının sinyallerini vermektedirler. Özellikle Almanya, Amerika, Çin ve Finlandiya gibi ülkelerin endüstri 4.0 ile ilgili birçok çalışma yapmakta olduklarını görmekteyiz.

Almanya 4. Endüstri devrimi için gelişmiş devlet politikaları ve hali hazırda bu alandaki çalışmalara verdiği önem sebebiyle diyebiliriz ki endüstri 4.0 konusunda öncü konumdadır. Özellikle Bosch, Siemens, Mercedes, BMW gibi dev markaların hem ülke gelirine hemde ülke istihdamına sağladığı katkılar, uyguladığı stratejiler bu öncülüğü fazlasıyla ispatlamaktadır. 2006 yılında oluşturulan ileri teknoloji stratejisi ile Almanya hem inovasyonu tetiklemiş hem de paydaşları ortak bir platformda toplayarak yatırımları desteklemiştir. Ayrıca 2010 yılında oluşturulan "İleri Teknoloji Stratejisi 2020" ile bilim ve endüstri arasındaki bağların artırılması hedeflenmiş ve bu kapsamda endüstri 4.0 için 200 milyon Euro kadar teşvik sanayi için ayrılmıştır.

Pazarının en büyüğü olarak görülen ve hızla büyüyen ekonomisini gelecekte de ayakta tutmak isteyen Çin ise sahip olduğu eşsiz insan gücüne rağmen bu liderliğini korumak için endüstri 4.0 stratejini takip etmektedir. Gelişmiş ülkelerin aksine Çin dijitalleşme sürecinin otomasyon ayağına odaklanmış ve "Akıllı fabrika 1.0" projesi ile üretim süreçlerinin dijitalleşmesi yönünde adımlar atmıştır.

Endüstri 4.0 ile ilgili çalışmaları uzun soluklu olan Amerika, gelişmiş teknolojisi ve inovasyon

kültürü ile 4. endüstri devrimine en yakın ülkelerden birisidir. Amerika'nın endüstriyel internet için yaklaşık iki milyar dolarlık bir fon ayırması ve aynı zamanda konuyla ilgili araştırmalar yapan Industrial Internet Consortium'u (IIC) kurmuş olması, bütün bunlarla birlikte ülkenin inovasyon, yazılım geliştirme ve eğitim alanlarında kanıtlanmış geçmişi endüstri 4.0 için ne kadar sağlam temellere sahip olduğuna dair ipuçları vermektedir.

Finlandiya, ülke olarak adından çok fazla söz ettirmese de endüstri 4.0 ile ilgili ciddi adımlar attığını söylemek mümkündür. Finlandiya'nın inovasyon ve teknoloji mali destek ajansı tarafından yürütülen Ar-Ge programı ve ayrıca farklı firmaları birbirine bağlayabilmek adına "Fin Endüstriyel İnternet Forumu (FIIF)" bulunmaktadır. Bu oluşum aynı zamanda sorunların çözümünde teknolojinin kullanımını artırmayı, daha hızlı test ve denemelerin yapılabilmesini, girişim aktivitelerini ve Ar-Ge çalışmalarını desteklemeyi, konuyla ilgili eğitimler düzenlemeyi ve özellikle Avrupa ve ABD'de yaşanan gelişmeleri takip etmeyi ve birlikte çalışma fırsatları oluşturmayı hedeflemektedir.

2020 yılında yaklaşık 50 milyar cihazın birbiriyle iletişim halinde olacağı tahmin edilmektedir. Akıllı üretim sistemlerinin, akıllı şehir, ev, lojistik, şebeke, cihaz unsurlarının sosyal ağlar ve e-ticaret ağlarıyla birleşmesi sonucu veriler, hizmetler, nesnelere ve bireylerin internet ortamını kullanarak kuracağı ekosistemdeki ağın önümüzdeki çeyrek asırda küresel ticaret hacminin yaklaşık %46'sını etkileyeceği öngörülmektedir.

Türkiye açısından ise endüstri 4.0 yaklaşımı, üretim ekonomisinde rekabet gücü, sürdürülebilirlik, katma değeri yüksek ürün ve hizmet üretmek anlamına gelmekte ve üretim sektörlerinin verimlilik artışının %4-7 arasında olacağı tahmin edilmektedir. Türkiye'nin endüstri devrimleri arasındaki konumunu tespit etmek ve atılması gereken adımları belirlemek amacıyla 2016 yılında TÜBİTAK'ın yapmış olduğu çalışma, sanayimizin dijital olgunluk seviyesinin Endüstri 2.0 ile Endüstri 3.0 arasında olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda Türkiye'nin Endüstri 4.0 (d)evrimini yakalaması ve öncü ülkeler arasında yer alması için; tüm sanayi şirketlerinin dijital teknolojilere erişiminin kolaylaştırılması, dijital sanayi platformlarının oluşturulması, akıllı endüstrinin yaygınlaşması için uygun çözümlerin sunulması

ve tüm paydaşların ortak bir ülke planı ve hedefi çevresinde odaklanarak çalışması gerekmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] A. V. Can ve M. Kıymaz, "Bilişim teknolojilerinin perakende mağazacılık sektörüne yansımaları: muhasebe departmanlarında endüstri 4.0 etkisi", *Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, CİEP Özel Sayısı, pp. 107-117, 2016.
- [2] S. Sayer ve A. Ülker, "Ürün yaşam döngüsü yönetimi", *Mühendis ve Makina*, cilt. 55, no. 657, pp. 65-72, 2014.
- [3] K. Witkowski, "Internet of things, big data, industry 4.0—innovative solutions in logistics and supply chains management", *Procedia Engineering*, vol. 182, pp. 763-769, 2017.
- [4] L.U. Yang, "Industry 4.0: a survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, in press.
- [5] Q. Jian, L. Ying and R. Grosvenor, "A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond", *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 173-178, 2016.
- [6] S. Andreas, E. Selim and W. Sihn, "A maturity model for assessing industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises", *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 161-166, 2016.
- [7] C. Prinz, F. Morlock, S. Freith, N. Kreggenfeld, D. Kreimeier and B. Kuhlenkötter, "Learning factory modules for smart factories in industrie 4.0", *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 113-118, 2016.
- [8] B. Mrugalska and M.K. Wyrwicka, "Towards lean production in industry 4.0.", *Procedia Engineering*, vol. 182, pp. 466-473, 2017.
- [9] A. J. Trappey, C. V. Trappey, U. H. Govindarajan, A. C. Chuang and J. J. Sun, "A review of essential standards and patent landscapes for the internet of things: a key enabler for industry 4.0", *Advanced Engineering Informatics*, in press.
- [10] Ege Bölgesi Sanayi Odası Araştırma Müdürlüğü, "Sanayi 4.0: uyum sağlayamayan kaybedecek, Ekim 2015.

- [11] A. Sinan, “Üretim için yeni bir izlek: sanayi 4.0”, *Journal of Life Economics*, no. 8, pp. 19-30, 2016.
- [12] J. Herter and J. Ovtcharova, “A model based visualization framework for cross discipline collaboration in industry 4.0 scenarios”, *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 398-403, 2016.
- [13] N. C. Batista, R. Melício and V. M. F. Mendes, “Services enabler architecture for smart grid and smart living services providers under industry 4.0”, *Energy and Buildings*, vol. 141, pp. 16-27, 2017.
- [14] F. Rennung, C. T. Luminosu and A. Draghici, “Service provision in the framework of industry 4.0.”, *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 221, pp. 372-377, 2016.
- [15] L. Thames and D. Schaefer, “Software-defined cloud manufacturing for industry 4.0.”, *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 12-17, 2016.
- [16] E. Hofmann and M. Rüşch, “Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics”, *Computers in Industry*, vol. 89, pp. 23-34, 2017.
- [17] M. Landherr, U. Schneider and T. Bauernhansl, “The application center industrie 4.0-industry-driven manufacturing research and development”, *Procedia CIRP*, vol. 57, pp. 26-31, 2016.
- [18] S. Aksoy, “Değişen teknolojiler ve endüstri 4.0: endüstri 4.0’ı anlamaya dair bir giriş”, *SAV Katkı*, cilt., 4, pp. 34-4, 2017.
- [19] S. Wang, J. Wan, D. Zhang, D. Li and C. Zhang, “Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination”, *Computer Networks*, vol. 101, pp. 158-168, 2016.
- [20] T. Stock and G. Seliger, “Opportunities of sustainable manufacturing in industry 4.0”, *Procedia CIRP*, vol. 40, pp. 536-541, 2016.
- [21] S. Erol, A. Jäger, P. Hold, K. Ott and W. Sihn, “Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production”, *Procedia CIRP*, vol. 54, pp. 13-18, 2016.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 25.07.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 07.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.330835	

Kurumsallaşma analizi için bulanık bilişsel haritalar temelli yeni bir yaklaşım

Enes Furkan Erkan^{*1}, Özer Uygun², Alper Kiraz³

ÖZ

Günümüzde, organizasyonların kurumsallaşma seviyelerini takip edebileceği ve bu takip sonucunda hangi iyileştirmeleri yapabilecekleri konusu çok önemli hale gelmiştir. Literatürde kurumsallaşmanın kavramsal olarak incelendiği birçok çalışma olmasına rağmen ileriye yönelik bir öngörü elde edilebilen sayısal yöntemlere dayalı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada, kurumsallaşma üzerinde etkili olan konseptler literatür ve uzman görüşleriyle belirlenerek yeni bir model önerilmiştir. Öncelikle uzmanlardan konseptler arasındaki ilişkiler dilsel olarak alınmıştır. Dilsel ifadeler, bulanık mantık uygulamalarında kullanılan ağırlık merkezi yöntemiyle sayısal değerlere dönüştürülmüştür. Daha sonra, Bulanık Bilişsel Haritalar (BBH) algoritması kullanılarak 3 farklı senaryo incelenmiş ve konseptlerin gelecekteki durumları analiz edilip, yorumlanmıştır. İlk senaryoda mevcut durumda kurumsallaşma konseptleri açısından kötü yönetilen bir organizasyon düşünülmüştür. BBH algoritması ile yapılan tahminde bu organizasyonda kurumsallaşma eğilimi gelecekte 0,027 değerine ulaşmıştır. İkinci senaryoda orta düzeyde bir organizasyon, üçüncü senaryoda da iyi düzeyde bir organizasyon düşünülmüştür. İkinci ve üçüncü senaryolar için kurumsallaşma eğilim değerleri 0,97 olarak elde edilmiştir. Fakat zaman periyodunu temsil eden iterasyon sayısı incelendiğinde üçüncü senaryodaki düşünülen organizasyonun bu değere 9 iterasyon önce ulaştığı görülmektedir. Bu da mevcut durumda üçüncü senaryodaki organizasyonunun iyi yönetildiğinden kaynaklanmaktadır. Geliştirilen model ile aynı zamanda kurumsallaşma üzerindeki en etkili konseptler de belirlenmiştir. Kurumsallaşmayı etkileyen en önemli konseptlerin süreç yönetimi, bilgi yönetimi ve stratejik yönetim olduğu tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalarla karşılaştırıldığında sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Bulanık bilişsel haritalar, kurumsallaşma, mükemmellik modelleri

* Corresponding Author

¹ Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye – eneserkan@sakarya.edu.tr

² Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye – ouygun@sakarya.edu.tr

³ Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye – kiraz@sakarya.edu.tr

A novel approach for institutionalization analysis based on fuzzy cognitive maps

ABSTRACT

Nowadays, it becomes very important to know the level of institutionalization and as a result what improvements they can make for organizations. Though there are many conceptual studies of institutionalization in the literature, there is no study based on numerical methods that can provide a foresight about institutionalization. In this paper, a new model has been proposed by determining concepts that are effective on institutionalization from literature and expert opinions. Firstly, the relationships between the concepts are taken from the experts linguistically. Linguistic expressions are converted to numerical values using the center of gravity method (COG) used in fuzzy logic applications. Then, three different scenarios were investigated by using the Fuzzy Cognitive Maps (FCMs) algorithm and the future states of the concepts were determined and interpreted. In the first scenario, an organization with poorly managed organizational concepts was considered. The institutionalization tendency in this organization has reached to 0,027 value which is the estimation calculated by FCM algorithm in the future. The second scenario and the third scenario represents a midlevel and good organization respectively. Institutionalization tendency values were 0.97 for the second and third scenarios. However, when the number of iterations representing the time period is examined, it is seen that the organization thought in the third scenario has reached this value before 9 iterations. This is because the organization in the third scenario is well managed in the current situation. With the developed model, the most effective concepts on institutionalization were also identified. It has been determined that the most important concepts affecting institutionalization are process management, information management and strategic management. Compared to the literature, the results seem to be consistent.

Keywords: Fuzzy cognitive maps, institutionalization, excellence models

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzdeki rekabet koşulları nedeniyle kurumsallaşma kavramı son zamanlarda oldukça önemli ve popüler hale gelmiştir. Kurumsallaşmayı özümseyen ve vazgeçilemez olarak düşünen organizasyonların uzun süreli yaşam döngüsü sürdürmeleri daha kolay olmaktadır. Bu yüzden organizasyonların gelişen çevreyle uyum sağlayan ve kendini sürekli yenileyebilen bir yönetim sistemine ihtiyaçları vardır. Organizasyonlar için kurumsallaşma bir yönetim sistemi olarak düşünülmelidir.

Kurumsallaşma, sürekli olmayan, sistematik işlemeyen, esnek olmayan aktivitelerden sürekli, sistematik ve şeffaf bir yapının oluşmasına izin veren bir süreçtir [1]. Kurumsallaşmanın artmasıyla organizasyon eşsiz bir kimliğe sahip olabilmektedir. Kurumsal teori bu noktada organizasyonun farklı süreçlerini incelemektedir.

Organizasyonların kurumsallaşma düzeyleri konusunda bilgi sahibi olmasını sağlayan birçok mükemmellik modeli bulunmaktadır. Bu modellerden en fazla tercih edilip kullanılanları ve

değerlendirme kriterleri Tablo 1’de verilmiştir. Değerlendirme kriterleri organizasyonlar için incelenip kurumsallık düzeyleri hakkında bilgi sahibi olunmaktadır. Böylelikle organizasyon rekabet ortamında daha ön planda olabilmektedir.

Karmaşık sistemlerin modellenmesi ve analizi oldukça zordur. Bu çalışmada kurumsallaşmanın analizi için görsel açıdan zengin ve eksik bilgi ile çalışabilme özelliğine sahip olan BBH (Bulanık Bilişsel Haritalar) metodu seçilmiştir. Çünkü kurumsallaşma karmaşık bir yapıya sahip ve seviyesinin belirlenebilmesi için uzman görüşüne ihtiyaç duyulan bir süreçtir. Bu sürecin hem durum tespiti için hem de ileriye yönelik bir öngörüsünün ortaya çıkarılması için BBH kullanımı oldukça uygundur. BBH metodu çeşitli alanlara uygulanmaktadır. Tablo 2’de BBH’ın çalışıldığı bazı alanlar gösterilmektedir.

Tablo 1. Bazı BBH uygulama alanları (FCMs implementations)

Yayınlar	Uygulama Alanı
[5], [6]	Siyasal ve Sosyal Bilimler
[7], [8], [9], [10], [11]	Sağlık
[12], [13], [14]	Mühendislik
[15], [16], [17]	İş
[18], [19]	Üretim Sistemleri
[20], [21], [22], [23]	Çevre ve Tarım
[24], [21], [25]	Bilgi Teknolojileri
[26], [27], [28]	Enerji

Organizasyonlar için süreçlerin yönetimi büyük önem taşımaktadır. Süreçlerin iyi yönetilmesi ise kurumsal mükemmelliyeti getirecektir.

Organizasyonlarda süreçler arası etkileşimler ve süreçlerin dış çevreyle etkileşimi kurumsallaşma düzeyini değiştirmektedir. Bu değişimin mevcut durumunun ve ileriye yönelik eğiliminin nasıl olacağı ise bu çalışmada odak noktası olup, literatürde bu tarz bir çalışmaya rastlanmamıştır. BBH yöntemi kurumsallaşma gibi kompleks sistemlerin modellenmesi ve analizinde oldukça uygun bir yöntemdir. Bu çalışma, BBH'ın kurumsallaşma alanına entegre edilmesiyle de bir yenilik taşımakta ve literatüre katkıda bulunmaktadır.

Çalışmada ikinci bölümde kurumsallaşma kavramı anlatılmış, üçüncü bölümde ise kurumsallaşma eğiliminin analizi için kullanılan BBH metodu açıklanmıştır. Dördüncü bölümünde yer alan uygulama kısmında oluşturulan 3 farklı senaryo için ileriye yönelik öngörüler yapıp, beşinci bölümde ise önerilen kurumsallaşma modelinde yer alan konseptlerin önem dereceleri tespit edilmiştir. Son olarak altıncı bölümde sonuç ve değerlendirmelere yer verilmiştir.

2. KURUMSALLAŞMA (INSTITUTIONALIZATION)

Günümüzde artan rekabet koşulları işletmeleri, oldukça zorlamaktadır. 1950'li yılların başından itibaren başlayan ve gittikçe artan rekabet, işletmelerin yönetim sistemlerine daha fazla önem vermesini sağlamıştır. Bu sebeple işletmeler finansal kaynaklarını daha iyi kullanmak, süreçlerini daha iyi organize etmek, işletmelerini daha kurumsal hale getirmek, müşteri odaklı çalışmalar yapmak zorundadırlar [29].

Bugüne kadar olan çalışmalarda kurumsallaşma kavramına ait birçok tanımlama yapılmıştır. Kurumsallaşma "istikrarsız, disiplin bulunmayan organizasyon kalıpları ya da dar teknik aktivitelerden, düzenli, istikrarlı, sosyal olarak bütünleşen kalıpların ortaya çıkışı" olarak tanımlanmıştır [30].

Bir başka tanım olarak kurumsallaşma, organizasyonun kendisine özgü eşsiz kurum kimliğine sahip olduğu, süreçlerini organizasyonel yapısı içinde sürekli değişebilecek ve geliştirilebilecek düzeyde tuttuğu ve sistemini kişilerden bağımsız olarak şeffaf bir şekilde sürdürebilmesidir [31].

Kurumsallaşma düzeyinin tespiti işletmeler için oldukça büyük önem arz etmekte ve oldukça güçtür. Çünkü kurumsallaşma sadece tek bir kavramdan ibaret değildir. Kurumsallaşma birçok süreci kapsayan ve bu süreçlerin birbirleriyle etkileşimleri ile değişebilen bir yönetim sistemidir. Kurumsallaşmada tam olarak başarı veya başarısızlıktan söz edilemez. Fakat kurumsallık açısından iyi veya kötü yorumları yapılabilir [31]. Kurumsallık düzeyleri organizasyonlar arasında farklılık göstermektedir. Bir organizasyon kurumsallaşmaya ne kadar önem veriyorsa, kurumsallık düzeyi de o derecede artacak ve zorlu rekabet koşulları altında daha fazla ön plana çıkabilecektir [32].

Kurumsallaşan bir organizasyonun kazanacağı yararlarından bazıları şunlardır [33]:

- Kurumsallaşma süreci çevreyle daha iyi iletişim sağlar.
- Kurumsallaşan bir organizasyonda adam kayırma durumu yok denecek kadar az seviyeye gelmiştir. Çalışanlar yöneticilerle kurduğu iyi veya kötü ilişkiler ile değil yaptıkları iş ile değerlendirilir.
- Ücret politikalarında adil bir tutumun ortaya çıkmasını sağlar.
- Organizasyonun bütçesinin iyi planlanmasını sağlar. Sürdürülebilir geleceğin oluşmasını kolaylaştırır. Dışarıdan danışmanlıkların alınmasını kolaylaştırarak daha objektif kararların alınmasını sağlar. Böylelikle eldeki bütçe en verimli şekilde değerlendirilir.
- Organizasyonda başka işletmeler ile olan işbirliği sürecini kolaylaştırır.

- Artan rekabet koşullarında günün koşullarının daha iyi takip edilmesini sağlar.
- Çalışanların kendilerini organizasyonun bir parçası olarak görmelerine yardımcı olur. Çalışanların da yönetimde söz sahibi olmalarını sağlayarak, statik bir yapıdan dinamik bir yapıya geçilmesini sağlar.
- Alınabilecek risklerin seviyelerinin daha iyi tespit edilmesini sağlar.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, kavram olarak kurumsallaşmanın önemini anlatıldığı birçok çalışmaya rastlanmıştır. Ayrıca kurumsallaşmayı etkileyen unsurlar ile ilgili de çok fazla çalışma vardır. Fakat kurumsallaşmanın bir modelinin kurulduğu ve kurumsallaşmanın ileriye yönelik eğiliminin belirlendiği sayısal bir model üzerine

hazırlanan çalışmalara rastlanmamıştır. Bu çalışmada kurumsallaşmayı etkileyen konseptler ile bir model oluşturulmuş ve BBH kullanılarak kurumsallaşmanın eğiliminin zaman bazlı incelemesi yapılmıştır. Böylelikle literatüre bir yenilik katılması amaçlanmıştır.

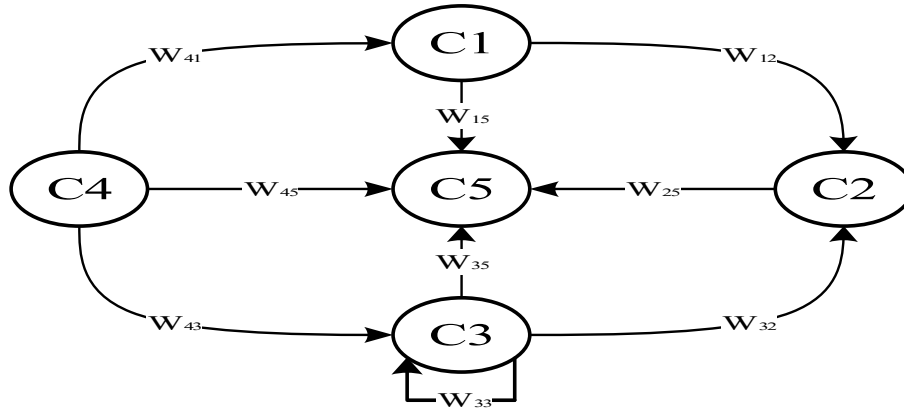
3. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

3.1. Bulanık Bilişsel Haritalar (Fuzzy Cognitive Maps)

BBH yöntemi karmaşık sistemlerinin analizi için görsel açıdan zenginleştirilmiş, Kosko tarafından 1986 yılında literatüre kazandırılmış bir karar destek sistemi yöntemidir [34]. Bilişsel haritaların etkileşimi baz alan yaklaşımına, bulanık mantık uygulaması entegre edilerek oluşturulmuştur [35].

Tablo 2. Mükemmellik modelleri değerlendirme kriterleri (Criteria of business excellence models)

Deming Modeli[2]	Baldrige Modeli [3]	EFQM Modeli [4]
Politikalar (10%)	Liderlik (10%)	Liderlik (10%)
Organizasyon (10%)	Bilgi ve Analiz (5%)	Strateji (10%)
Bilgi (10%)	Stratejik Planlama (10%)	Çalışanlar (10%)
Standardizasyon (10%)	İnsan Kaynakları Odağı (17%)	İş Birliktelikleri ve Kaynaklar (10%)
İnsan Kaynakları (10%)	Süreç Yönetimi (17%)	Süreçler, Ürünler ve Servis (10%)
Kalite Güvence (10%)	İş Sonuçları ve Şirket Performansı (24%)	Müşteriler ile İlgili Sonuçlar (15%)
Bakım (10%)	Müşteri Odaklılık ve Memnuniyet (17%)	Çalışanlarla İlgili Sonuçlar (10%)
İyileştirme (10%)		Toplumla İlgili Sonuçlar (10%)
Etkiler (10%)		İş Sonuçları (15%)
Gelecek Planları (10%)		



Şekil 1. Bulanık Bilişsel Harita yapısı (Simple FCMs)

Bir BBH, sistemdeki kavramlar arasındaki nedensellik ilişkilerini gösteren ve karmaşık sistemin birikmiş bilgilerinden yararlanarak sistemin davranışını sembolik bir biçimde açıklayan basit bir yoldur [17]. Bulanık bilişsel haritalar yönteminin klasik yaklaşımına son zamanlarda birçok yaklaşım eklenmiştir ve yöntem üzerinde geliştirilmeler yapılmıştır [36].

BBH esnek bilgiyle çalışabilme özelliğine sahiptir. Sistemi tanımlayan kavramlardan gereksiz olarak düşünülenler kolaylıkla sistemden çıkarılabilmekle beraber, sistemi etkilediği sonradan düşünülen kavramlar da kolaylıkla sisteme dahil edilebilmektedir. BBH, sistemi bütünsel olarak ele alır. Kavramsal ilişkiler BBH ile kolaylıkla ifade edilebilmektedir [10].

Şekil 1’de bir BBH yapısı gösterilmektedir. Oklar, kavramsal düğümler arasındaki nedenselliği, W_{ij} ise sistemin her bir anahtar kavramı arasındaki ilişkinin ağırlığını göstermektedir. Ağırlık açısından üç durum mevcuttur;

- C_i , C_j 'yi pozitif olarak etkiler. Kavramlardan herhangi biri herhangi bir düzeyde artarsa, diğer kavram da artacaktır ($W_{ij} > 0$).
- C_i , C_j 'yi negatif olarak etkiler. Kavramlardan birinin herhangi bir seviyede artması/azalması durumunda, diğer kavram azalacak/artacaktır ($W_{ij} < 0$).
- C_i ve C_j kavramları, ne pozitif ne de negatif etkileşim içindedir. Bu, C_i ile C_j arasında hiçbir etkileşim olmadığı anlamına gelir ($W_{ij} = 0$) [37].

C_1, C_2, \dots, C_n sistemin konseptlerini temsil etmektedir. Sistemin analizinde, zaman

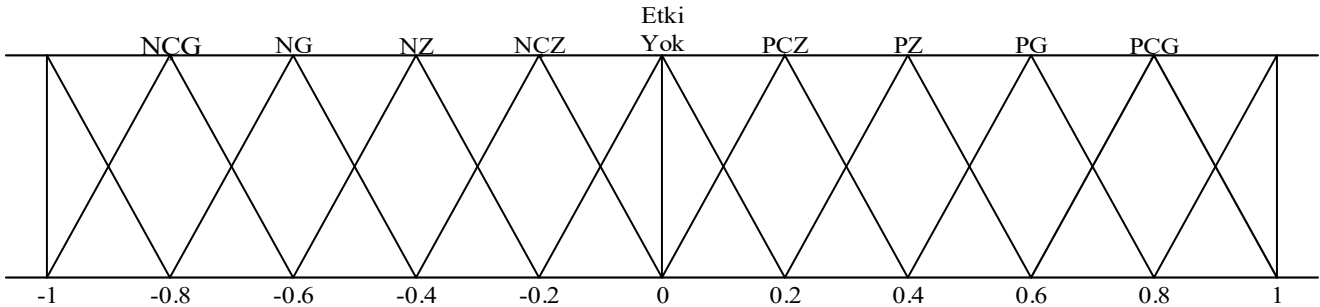
periyodunun belirlenmesi çok önemlidir. Çünkü A vektörü, konsept değerleri vasıtası ile sistemin mevcut durumdaki temsilini sunmaktadır ve değişimin alacağı zaman periyodunu belirlemek sistemi inceleyen uzmanları doğru yönlendirecektir [38]. Zaman periyodunun ne olacağına alanında uzman kişiler karar verir. Durum vektörü, BBH’ın dinamik çalışan algoritmasından ötürü, zaman periyodunu temsil eden her aşamadaki etkileşimlerden etkilenir. Sistemi çalıştırabilmek için başlangıç vektörü ve ağırlık matrisi belirlenmelidir. (1) denkleminde verilen modifiye edilmiş çıkarım algoritmasıyla, başlangıç durum vektöründe kavramların başlangıç değerlerinin eksik veya belirlenmesi zor olduğu ve sifıra ayarlandığı durumlarda eksik girdilerin etkisini azaltmak için uygulanmaktadır. Bu denklem başlangıç vektörüne uygulandıktan sonra, yeni vektör bulunur [39]. Yeni vektör, bir sonraki zaman periyodunda ulaşılmış durum olarak yorumlanabilir.

$$A_i^{(k+1)} = f\left(\left(2 \times A_i^{(k)} - 1\right) + \sum_{j=1, j \neq i}^N W_{ij} \times \left(2 \times A_j^{(k)} - 1\right)\right) \quad (1)$$

$A_i^{(k+1)}$, C_i konsept değerinin $(k + 1)$. adımdaki değerini; $A_j^{(k)}$, C_j konseptinin (k) . adımdaki değerini ve W_{ij} ise etkileşim ağırlıklarının bulunduğu matrisi göstermektedir. Aşağıdaki denklemler (2 ve 3), değerlerin sırasıyla $[0,1]$ ve $[-1,1]$ arasında kalması için gerekli dönüşüm fonksiyonlarıdır [40]. Literatürde kullanılan çeşitli dönüşüm fonksiyonları bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları sigmoid ve tanjant fonksiyonlarıdır.

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda x}} \quad (2)$$

$$f(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad (3)$$



Şekil 2. Dilsel değişken üyelik fonksiyonu (Structure of linguistic variables)

Burada dönüşüm fonksiyonu içinde yer alan x değeri, (1)’den elde edilen değerdir. Kurumsallaşma modelinin gereği olarak negatif sayıların anlamsız olmasından dolayı değerleri

$[0,1]$ aralığında tutmak için bu çalışmada sigmoid dönüşüm fonksiyonu kullanılmıştır.

Bu çalışmada, kurumsallaşma eğilimini değerlendirmek için dilsel değişkenler ile değerlendirme yapısına uyumlu BBH kullanılmıştır. İlgili alandaki her uzman kendi görüşünü şekil 2'deki dilsel değişkenler ile belirtmiştir.

Dilsel değişkenlerin üçgen üyelik fonksiyonları ile belirtilmesinin nedeni sezgisel olarak oluşturulma kolaylığıdır [41]. Literatürdeki BBH çalışmaları incelendiğinde üçgensel üyelik fonksiyonları ile oluşturulmuş dilsel değişkenlere sıkça rastlanmaktadır. Dilsel değişkenler için kullanılacak üyelik fonksiyonlarının sabit bir sayısı olmamakla birlikte çok fazla sayıda kullanımı uzmanların görüşleri alınırken problem oluşturabilmektedir.

Birçok model karar vericilere sayısal veri kullanmak için gerekli imkanı sağlayamaz. BBH, dilsel değişkenler yapısıyla bu tür modelleri çözebilme yeteneğine sahip bir metottur. Dilsel değişkenler $[-1,1]$ aralığındaki üyelik fonksiyonlarını kullanarak değerler alabilmektedirler. Konseptler arasındaki etkinin gücünü, bulunduğu aralık belirlemektedir. Şekil 2'de belirtilen yapıda 8 adet etki dilsel değişkeni bulunmaktadır {(Negatif çok güçlü (NÇG), negatif güçlü (NG), negatif zayıf (NZ), negatif çok zayıf (NÇZ), pozitif çok zayıf (PÇZ), pozitif zayıf (PZ), ,pozitif güçlü (PG), pozitif çok güçlü (PÇG)} . Dilsel değişken üyelik fonksiyonlarının sabit bir yapısı bulunmamaktadır. Dilsel değişkenlerin sayısı karar vericilerin inisiyatifi altındadır. Fakat unutulmamalıdır ki çok fazla sayıda olan dilsel değişken, uzmanlar için ifade anlamında zor olacak ve konseptler arasındaki etkinin tanımlanması güçleşecektir.

3.2. Çıkarım Algoritması (Inference Algorithm)

Model yapısının oluşturulmasından sonra, BBH yönteminin çıkarım algoritması uygulanır. Algoritmanın adımları aşağıdaki gibidir:

- Sistemin mevcut durumunu ifade eden $A^{(k)}$ vektörü tanımlanır.
- (2) ve daha sonra (3) veya (4) işlemleri uygulandıktan sonra bir adım sonrasında ortaya çıkan yeni durum matrisi $A^{(k+1)}$ bulunur.
- Elde edilen $A^{(k+1)}$ durum vektörü, gelecek iterasyonun yeni $A^{(k)}$ vektörüdür.
- Adım 2 ve 3, $A^{(k+1)} - A^{(k)} < 0,001$ bulununcaya kadar tekrar eder.

Her yinelemede bulunan $A^{(k+1)}$, uzmanlar tarafından önceden belirlenmiş aktivasyon değerlerine göre sistem durumunu göstermektedir [38].

BBH yönteminin avantajları kısaca aşağıda belirtilmiştir:

- Belirsizlik içeren, eksik bilgiyle çalışabilen esnekliğe sahip olması, kompleks sistemlerin modellenmesi için uygundur. Ayrıca modelleme gerçekleştirilirken dilsel değişkenlerin kullanımı nedeniyle uzmanlara kolaylık sağlayabilmektedir [34].
- BBH, bulanık mantık, bilişsel haritalar ve yapay sinir ağları gibi çeşitli yöntemleri içerisinde barındırmaktadır. Bulanık mantığın nitel değerlere uygun oluşunun, bilişsel haritalar yöntemin konseptler arasındaki ilişkileri incelemesinin, yapay sinir ağlarının ileri besleme özelliklerinin avantajlarından yararlanmaktadır [35].
- BBH, konseptler arasındaki gizli olan ilişkileri göz ardı etmeden sistemi dinamik olarak modelleyebilmektedir. [44].

BBH yönteminin avantajları ile kurumsallaşmanın kompleks yapısı bir araya getirildiğinde bu çalışmada kurumsallaşma eğiliminin BBH yöntemiyle analiz edilmesine karar verilmiştir.

4. UYGULAMA (IMPLEMENTATION)

Bu bölümde statik ve dinamik olmak üzere iki kısımda uygulama incelenmiştir. Statik analiz kısmında, sistemin durumu genel anlamda çıkarılmaya çalışılmıştır. Mevcut durumun ve sistemin analizi yapılmıştır. Dinamik analiz kısmında ise oluşturulan senaryolar zaman bazlı incelemeye alınmıştır. Sonuçların anlamlılığı uzmanlar tarafından belirlenmeye çalışılmıştır.

4.1. Statik Analiz (Static Analysis)

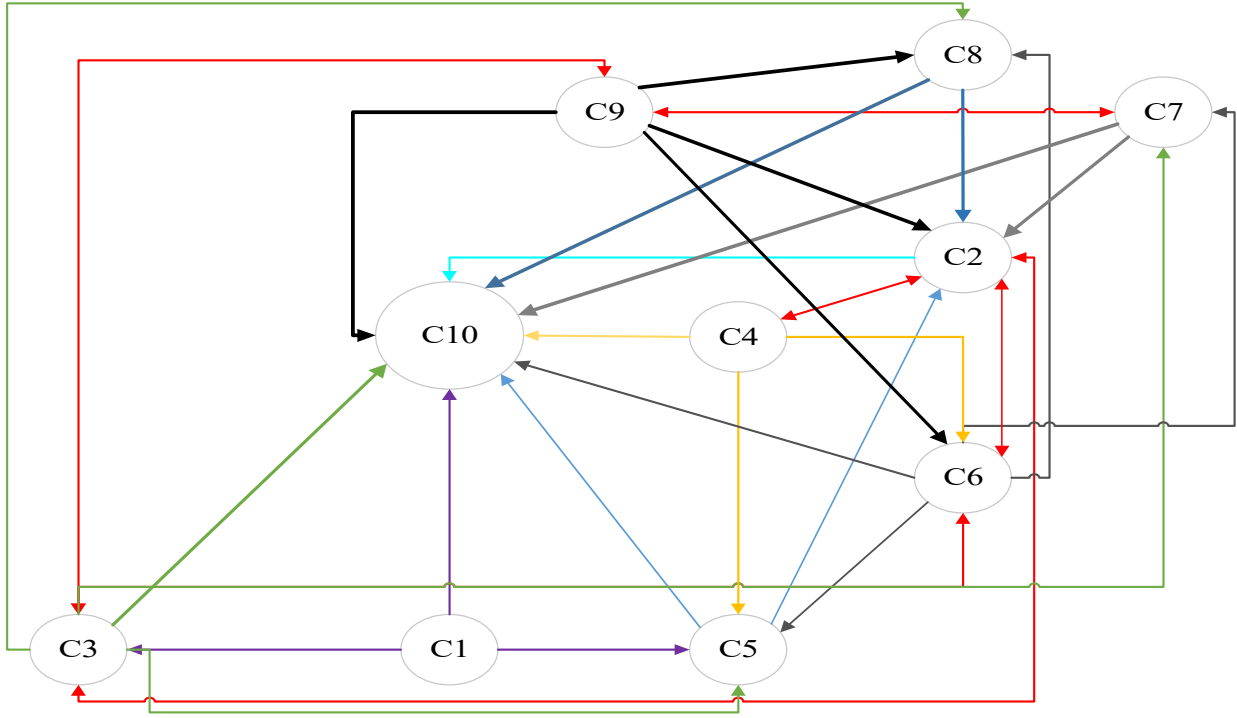
Kurumsallaşma teorisi, bir model olarak kurumsallaşma etkileyen değerlerden bahsediyor olsa bile kurumsallaşmanın düzeyini ve ileriye yönelik nasıl bir yol izleyeceği konusunda ilgilenmez. Geliştirilen modelde konseptler, kurumsallaşma eğilimini analiz etmek ve üzerinde durulması gereken en önemli hususların tespit edilmesi için belirlenmiştir. Ayrıca, kurumsallaşmaya olumsuz yönde etki eden konseptler olarak görülen bürokratik engeller [37]

ve adam kayırma [38], ([29], [47])'un makalelerinde yer alan tüm konseptlere ek olarak bu çalışmada yer almıştır. Belirlenen tüm konseptlerin ayrıntılı açıklaması Tablo 3'de verilmektedir. C1'den C9'a kadar olan konseptler, bu çalışmanın çıktısı konsepti olan C10'u etkileyen girdi konseptleridir. Geliştirilen kurumsallaşma modeli için geliştirilen ilişki haritası 3 uzmanın ortak görüşleriyle oluşturulmuştur. Çalışmaya

katkı sağlayan 3 uzman, popüler mükemmellik modellerinden biri olan EFQM (Avrupa Kalite Yönetim Vakfı) için değerlendirici görevi üstlenmektedirler. Şekil 3'te konseptler arasındaki ilişkiler görülmektedir. Geliştirilen ilişki haritasında birbirini karşılıklı olarak etkileyen konseptler arasındaki ilişkilerde kırmızı renk, diğer tek yönlü etkilerde ise konseptlere özel renkler kullanılmıştır.

Tablo 3. Önerilen kurumsallaşma modeli konseptleri (Affecting concepts to the institutionalization tendency) [48]

Konseptler	Açıklamalar
Bürokratik Engeller (C1)	Bürokratik engeller, organizasyonun tüm proseslerini zorlaştırıcı yasal düzenlemeleri kapsar. Faaliyetlerin olması gerekenden uzun sürede gerçekleştirilerek uygulanmasına ve hatta bazen uygulanamamasına neden olur.
Stratejik Yönetim (C2)	Stratejik yönetim esas olarak kuruluşun stratejik analizi (dış ve iç), strateji tanımlama, stratejik planlama ve organizasyonun stratejik performans değerlendirmesinden oluşur.
Süreç Yönetimi (C3)	Süreç yönetimi, bir organizasyonun tüm süreçlerini tanımlamak, aralarındaki etkileşimleri belirleyerek bunları haritalamak, süreçlerin organizasyon genelinde uygulanması, süreç iyileştirme ve yenilikçilik içermektedir.
Teknoloji Yönetimi (C4)	Teknoloji yönetimi, teknoloji planlaması, araştırma, geliştirme ve yenilik yönetimi ile gelişmiş teknolojinin pazarlanması ve ticaretinden oluşmaktadır.
Ürün Yönetimi (C5)	Ürün yönetimi, ürün özelliklerini belirlemeyi, ürünlerin tasarımı, planlanması ve veri yönetimi ile müşteri ihtiyaçlarına göre ürün yeniliğini içermektedir.
Bilgi Yönetimi (C6)	Bilgi yönetimi, örgütsel bilgi tanımını, bilgi ve bilgi teknolojisini kullanma becerisini, öğrenme organizasyonları olarak bilgi kültürünü ve bilgi yönetiminin performansını kapsar.
İnsan Kaynakları Yönetimi (C7)	İnsan kaynakları yönetimi, insan kaynakları planlamasını, personel kabiliyetlerini geliştirmeyi, adaleti ve eşitliği teşvik eder, personelin motivasyon ve bağlılık için ödüllendirilmesi ve tanınması, personelin beceri ve bilgilerini kullanacak bir şekilde katılımını sağlar.
Kurumsal Çevre (C8)	Kurumsal çevre ortamı, dış ortaklıklar, pazar ve rekabet ortamı ve müşterilerden oluşur. Organizasyon, sürdürülebilirlik açısından ortakları, tedarikçileri ve toplumsal etkiyi yönetmelidir.
Adam Kayırma (C9)	Adam kayırma, organizasyonun hak edilmediği halde çalışanlara karşı haksız tutumu anlamına gelir. Haksız başarı değerlendirmeleri, haksız istihdam süreci, maaşlardaki eşitsizlikler, promosyon ve diğer tüm süreçlerdeki dengesiz ve adaletsiz iş ortamından oluşmaktadır.
Kurumsallaşma Eğilimi (C10)	Kurumsallaşma eğilimi, C1'den C9'a kadar olan konseptlerin yönetiminin sonucu olarak ortaya çıkan ve kurumsallaşmanın yönünü belirleyen çıktı konseptidir.



Şekil 3. Önerilen kurumsallaşma modeli ilişki haritası (FCM model for institutionalization)

Ardından, uzmanlar tarafından, IF-THEN kuralları Şekil 2’de verilen dilsel değişkenler ile oluşturularak (negatif çok güçlü, negatif güçlü, negatif zayıf, negatif çok zayıf, pozitif çok zayıf, pozitif zayıf, pozitif güçlü ve pozitif çok güçlü), konseptler arasındaki ilişkiler belirlenmiştir.

Birinci Uzman; Bürokratik engeller üzerinde (C1) küçük bir değişiklik meydana gelirse, kurumsallaşmanın eğilimi (C10) üzerinde orta düzeyde bir değişiklik meydana gelir. Buradan, C1’den C10’a olan etkinin "negatif zayıf" olduğu yorumunu çıkarmıştır.

İkinci Uzman; Bürokratik engeller üzerinde küçük bir değişiklik meydana gelirse (C1), kurumsallaşma eğilimlerinde küçük düzeyde bir değişiklik meydana gelir (C10). Buradan, C1’den C10’a olan etkinin "negatif çok zayıf" olduğu yorumunu çıkarmıştır.

çüncü Uzman; Bürokratik engellerde (C1) küçük bir değişiklik olursa, kurumsallaşmanın eğilimi (C10) üzerinde orta bir değişiklik meydana gelir. Buradan, C1’den C10’a olan etkinin "negatif zayıf" olduğu yorumunu çıkarmıştır.

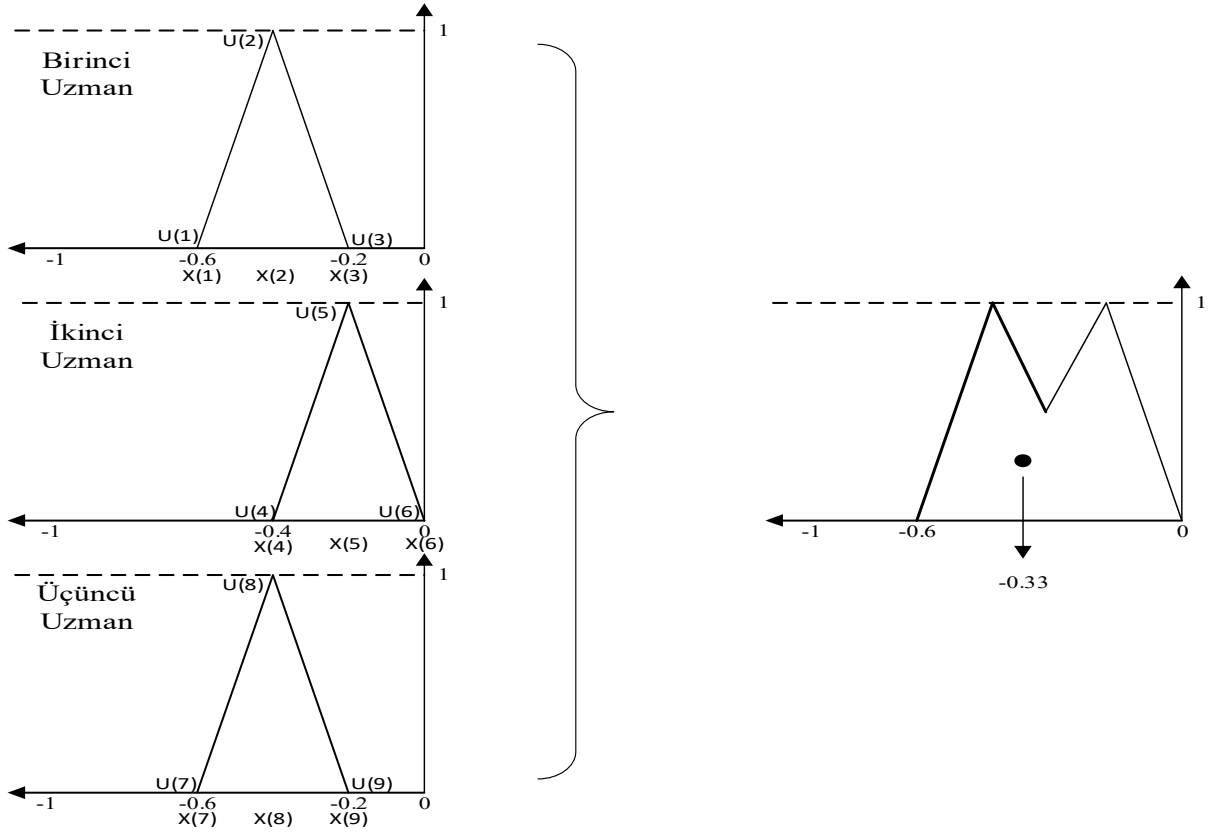
Uzmanlar tarafından IF-THEN kuralları sonucu dilsel değişkenlerle tanımlanan ilişkiler belirlendikten sonra, sırasıyla SUM metodu ve bir

durulaştırma yöntemi olan ağırlık merkezi yöntemi uygulanıp konseptler arasındaki ilişkiler sayısal değerlere dönüştürülmüştür.

Şekil 4’te bürokratik engeller (C1) ile kurumsallaşma eğilimi (C10) konseptleri arasındaki ilişkinin gücünü bulmak için yapılan işlemler gösterilmiştir. Sonuç olarak $W_{C1 \rightarrow C10}$ değeri -0.33 olarak bulunmuştur ve bu da iki konsept arasındaki ilişkinin gücü anlamına gelmektedir. Belirlenen tüm ilişkilerin dilsel değişkenleri SUM metodu ile bir araya getirildikten sonra ağırlık merkezi yöntemi kullanılarak sayısal değerlere çevrilmiştir. Denklem 4’te ağırlık merkezi için kullanılan formül verilmektedir. Sonuç olarak elde edilen tüm ağırlıklar Tablo 4’te gösterilmiştir. Tablodan anlaşılacağı üzere C1 (Bürokratik Engeller) konsepti, sistem içerisinde diğer konseptlerin değişiminden etkilenmeyip, diğer konseptleri etkilemektedir. Çıkarım mekanizması boyunca da sadece dış dünyadan etkilendiği için başlangıç değerini korur ve Denklem 1 ile verilen çıkarımdan etkilenmez.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n x_i u(x_i)}{\sum_{i=1}^n u(x_i)} \quad (4)$$

$$W_{C1 \rightarrow C10} = \frac{(-0.6 \times 0) + (-0.4 \times 1) + (-0.2 \times 0) + \dots + (-0.2 \times 0)}{(0+1+0+0+1+0+0+1+0)} = -0.33$$



Şekil 4. Ağırlık merkezi yöntemi ile ağırlıkların hesaplanması (Numerical weights converted using sum method and centre of gravity)

Tablo 4. Ağırlık matrisi (Weight Matrix)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	0	0	-0.67	0	-0.67	0	0	0	0	-0.33
C2	0	0	0.27	0.20	0	0.20	0	0	0	0.73
C3	0	0.73	0	0	0.60	0.40	0.20	0.27	-0.67	0.67
C4	0	0.27	0	0	0.60	0.60	0	0	0	0.33
C5	0	0.47	0	0	0	0	0	0	0	0.66
C6	0	0.67	0.60	0	0.27	0	0.47	0.73	0	0.53
C7	0	0.47	0	0	0	0	0	0	-0.67	0.73
C8	0	0.27	0	0	0	0	0	0	0	0.27
C9	0	-0.20	-0.33	0	0	-0.40	-0.67	-0.53	0	-0.80
C10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kurumsallaşma eğiliminin BBH yöntemiyle analiz edilmesini amaçlayan bu çalışmada uzman görüşleri alınarak belirlenen ağırlık matrisi, DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) yönteminin kriter ilişkilerinin belirlenmesi aşamasından esinlenerek çalışmaya uyarlanmıştır. Bu yöntemin kullanılmasının nedeni uzman görüşleriyle oluşturulan ağırlık matrisinden anlamlı sonuçlar elde edebilmektedir. Bulunan D+R ve D-R değerleriyle konseptlerin önem dereceleri ve etki düzeyleri belirlenebilmektedir. Konseptlerin birbirleri üzerindeki etki düzeyleri ile ilgili olarak Tablo 5 oluşturulmuştur. DEMATEL yönteminde olduğu gibi Tablo 5’de konseptler arası toplam ilişki matrisi verilmiştir. Ancak burada farklı olarak, toplam etki düzeylerinin hesaplanmasında

negatif etki ağırlıklarının azaltıcı bir rol oynamaması bakımından mutlak değerleri alınmıştır.

Tablo 5. Nedensellik matrisi (Causality matrix)

	D	D+R	D-R
C1	1.67	1.67	1.67
C2	1.40	4.48	-1.68
C3	3.54	5.41	1.67
C4	1.80	2	1.60
C5	1.13	3.27	-1.01
C6	3.27	4.87	1.67
C7	1.87	3.21	0.53
C8	0.54	2.07	-0.99
C9	2.93	4.27	1.59
C10	0	5.05	-5.05

Denklem (4) ile elde edilen satırlar toplamı (D), ilgili satırdaki bir konseptin diğer tüm konseptlere olan etkisinin toplamını vermektedir. Denklem (5)

ile elde edilen sütunlar toplamı (R) ise ilgili sütundaki bir konseptin diğer tüm konseptlerden aldığı etkilerin toplamını vermektedir.

$$D = \sum_{j=1}^N W_{ij} \quad (4)$$

$$R = \sum_{i=1}^N W_{ji} \quad (5)$$

Buna bağlı olarak (D+R) değeri, ilgili konseptin önem derecesini belirtmektedir. Tablo 5 açıkça göstermektedir ki; en yüksek (D+R) değerlerine sahip olan kurumsallaşma modeli konseptleri C3 (Süreç Yönetimi), C6 (Bilgi Yönetimi) ve C2 (Stratejik Yönetim) olarak karşımıza çıkmaktadır. Geri kalan konseptlerin önem dereceleri Tablo 5’de görülmektedir.

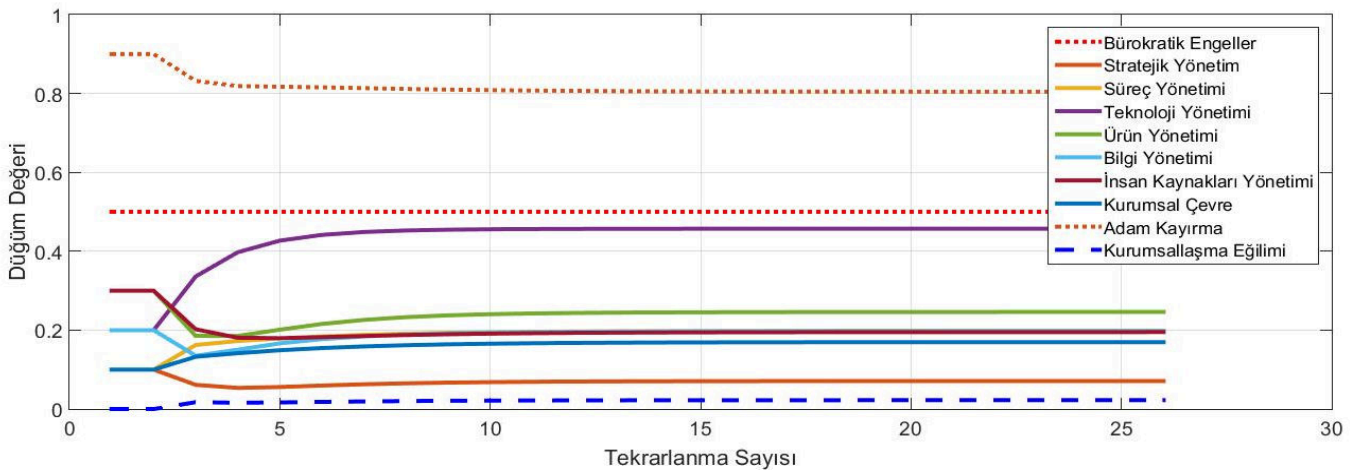
(D-R) değerleri ise bir konseptin etki alan veya etki veren gruplarından hangisine ait olduğunu belirtmektedir. Bu değerlerden pozitif olanlar etkileyen konseptler, negatif olanlar ise daha ziyade etkilenen konseptleri vermektedir. Tablo 5’de görüldüğü üzere C2, C5, C8 ve C10 negatif (D-R) değerlerine sahip olduklarından etkilenen grubu oluşturmuştur. Öte yandan aldığı pozitif değerler ile C1, C3, C4, C6, C7 ve C9 konseptleri de etkileyen grubu belirtmektedir. C1, C3 ve C6 en pozitif değere sahip konseptlerdir. Bu konseptlerin en büyük (D-R) pozitif değerine sahip olduğu, bu da konseptlerin geri kalanını etkileyen en güçlü etkiye sahip oldukları anlamına gelir. Bu sebeple karar alıcılar, organizasyonun kurumsallaşmasını arttırmak için belirtilen konseptlere daha fazla odaklanmalıdır ve böylelikle diğer konseptler de etkilenerek iyileştirecektir. Öte yandan en küçük negatif (D-R) değerine sahip C10 yani kurumsallaşma eğilimi en fazla etkilenen konsepti

belirtmektedir. Çıktı konsepti olması sebebiyle model için beklenen bir durumdur.

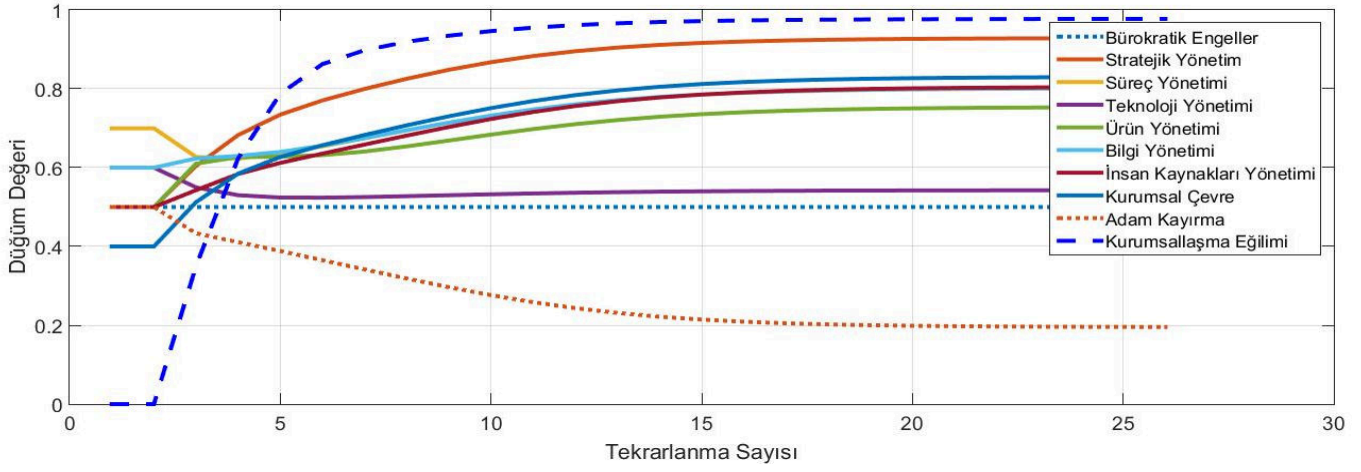
4.2. Dinamik Analiz (Dynamic Analysis)

Konseptler arasındaki ilişkilerin ağırlıkları belirlendikten sonra, kurgulanan üç senaryo için kurumsallaşma açısından durum analizi yapılmıştır. Üç senaryo belirlenirken kötü, orta ve iyi düzeylerde yönetilen işletmeler düşünülmüştür. Senaryoların mevcut durumunu gösteren ilk durum vektörünü belirlemek için uzmanlardan görüş alındığı varsayılmıştır. İlgili ülkede bazı bürokratik engeller ile karşı karşıya kalındığından her senaryo için bürokratik engeller (C1), orta düzeyde düşünülerek 0.5 olarak eşit kabul edilmiştir. Kurumsallaşma eğilimi (C10) ise bütün senaryolarda üzerinde meydana gelen değişikliklerin kolay takibi için 0 olarak kabul edilmiştir. Uygulamada gerekli kodlar MATLAB R2015/a programı ile yazılmıştır. İncelenen üç senaryoya ait uygulamalar aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Senaryo 1: Alanında uzman üç değerlendiricinin yaptığı ortak değerlendirmenin sonucu olarak başlangıç vektörü A aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Bu senaryoda, tüm konseptlerin işletmede kötü yönetilmesi durumu incelenmiştir. C9 (adam kayırma) konseptinin yüksek olması organizasyon için iyi bir durum değildir. Bunun anlamı organizasyonda yüksek düzeyde adam kayırma yapılmaktadır. Ayrıca literatürde kurumsallaşma için en önemli konseptlerden olduğu varsayılan stratejik yönetim (C2) ve süreç yönetimi (C3) de 0.1 değeri alarak oldukça kötü bir başlangıç vektörü, BBH algoritmasına girdi olarak sokulmuştur.



Şekil 5. Senaryo 1'in grafiği (The graph of the Scenario 1)



Şekil 6. Senaryo 2'nin grafiği (The graph of the Scenario)

$$A^{\text{başlangıç}} = [0.5 \ 0.1 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.2 \ 0.3 \ 0.1 \ 0.9 \ 0]$$

$$A^{\text{final}} = [0.500 \ 0.071 \ 0.198 \ 0.457 \ 0.246 \ 0.197 \ 0.195 \ 0.169 \ 0.804 \ 0.022]$$

(1) ve (2) denklemleri uygulandıktan sonra, tüm konseptlerin gelecekte beklenen eğilimleri A^{final} vektörü ve Şekil 5'teki gibi elde edilmiştir. İncelenen senaryoda kurumsallaşma eğiliminin en kötü düzey olan 0'a doğru gittiği görülmektedir. Bunun nedeni kurumsallaşmayı olumlu etkileyen konseptlerin iyi derecede yönetilmemesi ve adam kayırma durumunun çok fazla düzeyde olmasıdır. Böyle bir senaryoda kurumsallaşma bu şekilde başarılı olamayacak ve kurumsallıktan bahsedilemeyecek düzeye gelecektir. Organizasyonun süreçlerini iyileştirmesi gerekmektedir. Kırılma noktası incelendiğinde süreç yönetimi (C3) ve teknoloji yönetimindeki (C4) az düzeyde artış, kurumsallaşma eğilimini az düzeyde olumlu seviyeye çekebilmiş, fakat diğer konseptlerdeki kötü durum kurumsallaşmanın gelişmemesine sebep olmuştur.

Senaryo 2: Bu senaryo orta büyüklükte ve nisbeten kurumsallaşmayı başarmış bir işletmeyi temsil etmektedir. Süreçlerin kötü olmamakla birlikte çok da iyi yönetilmediği varsayılmıştır. Buna göre başlangıç vektörü aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

$$A^{\text{başlangıç}} = [0.5 \ 0.5 \ 0.7 \ 0.6 \ 0.5 \ 0.6 \ 0.5 \ 0.4 \ 0.5 \ 0]$$

$$A^{\text{final}} = [0.500 \ 0.928 \ 0.801 \ 0.542 \ 0.753 \ 0.801 \ 0.804 \ 0.829 \ 0.195 \ 0.977]$$

(1) ve (2) denklemleri uygulandıktan sonra gelecekte konseptlerin alacağı durum A^{final} vektörü ve Şekil 6'da gösterildiği gibi ortaya

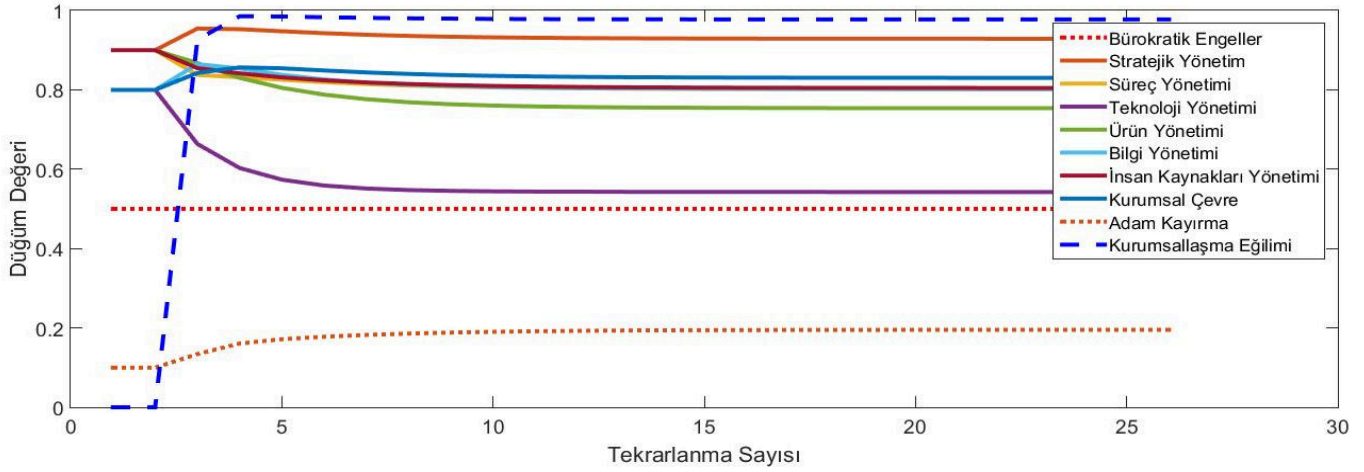
çıkmiştir. Bu senaryoda, istenen kurumsallaşma eğilimine 13 iterasyondan sonra ulaşılabilmektedir. Ancak 2 ile 6. Yıllar arasında kurumsallaşma düzeyi hızla artış göstermektedir. Çünkü kurumsallaşmayı olumlu yönde etkileyen konseptler, bu senaryonun mevcut durumunda iyi yönetilmektedir. Buna ek olarak kurumsallaşmayı olumsuz etkileyen adam kayırma durumu da orta seviyededir. Mevcut durumda hali hazırda orta seviyede olan adam kayırma durumu ise kurumsallaşma eğiliminin aksine zıt yönlü bir seyir izlemiştir.

Senaryo 3: Bu senaryoda, kurumsallaşmayı sağlayan bütün konseptlerin son derece iyi yönetildiği durum ele alınmıştır. Kurumsallaşma bilinci, yöneticilerden çalışanlara kadar her seviyede hissedilmektedir. Buna göre başlangıç vektörü aşağıdaki gibi oluşturulmuştur:

$$A^{\text{başlangıç}} = [0.5 \ 0.9 \ 0.9 \ 0.8 \ 0.9 \ 0.8 \ 0.9 \ 0.8 \ 0.1 \ 0]$$

$$A^{\text{final}} = [0.500 \ 0.928 \ 0.801 \ 0.542 \ 0.753 \ 0.802 \ 0.804 \ 0.830 \ 0.195 \ 0.977]$$

Benzer şekilde (1) ve (2) denklemleri uygulanarak tüm konseptlerin gelecek dönem eğilimleri ile ilgili olarak A^{final} vektörü ve Şekil 7 elde edilmiştir. Bu senaryoda, istenen kurumsallaşma eğilimine hızlıca 3 iterasyon sonrasında ulaşılabilmektedir. Çünkü kurumsallaşmayı olumlu yönde etkileyen konseptler, bu organizasyonun mevcut durumunda çok iyi yönetilmektedir. Buna ek olarak kurumsallaşmayı olumsuz etkileyen adam kayırma durumu da oldukça düşük seviyededir. İnsan kaynakları yönetimindeki düşüş adam kayırma durumunu da bir miktar arttırmıştır. Fakat yine de kabul edilebilir düzeyde kalmıştır.



Şekil 7. Senaryo 3'ün grafiği (The graph of the Scenario 3)

5. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Kurumsallaşma, organizasyonlar tarafından iyi yönetilmesi gereken bir süreçtir. Günümüz şartları altında organizasyonların, sürdürülebilir yaşam döngüleri için belirli çalışanlara veya yöneticilere bağlı olmadan faaliyet göstermeleri gerekmektedir. İstenen kurumsallaşma seviyesine nasıl ulaşılabileceği organizasyonlar tarafından tam olarak bilinemezse, bu durum onlar için büyük bir sorun haline gelecektir. BBH yöntemi bu tarz sistemlerin karmaşık yapılarını modellemeye izin vermektedir.

Literatürde kurumsallaşmayı ele alan çalışmalar incelendiğinde kurumsallaşma üzerinde etkili olan kriterlerin birçok çalışmada süreç yönetimi, bilgi yönetimi ve stratejik yönetim olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmada da en etkili kriterler literatüre uygun olarak bulunmuştur. Ayrıca kurumsallaşmayı sayısal yöntemlerle analiz eden çalışmaların az sayıda olduğu gözle çarpılmaktadır. Bu çalışmada, mevcut durum analizinin yanısıra literatüre bir katkı olarak kurumsallaşmanın geleceğe yönelik öngörüsü de senaryolar bazında incelenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, karmaşık bir sistem olan kurumsallaşmayı modellemek ve analiz etmektir. BBH, karmaşık sistemlerin durumunu grafiksel olarak göstermek için faydalı bir yöntemdir. Bu çalışmada, kurumsallaşma eğilimini etkileyen konseptler arasındaki ilişkiler üzerinde odaklanılmıştır. Böylece, kurumsallaşma eğilimi belirlenebilir ve karar vericilerin beklenen koşullara ulaşmasının ne kadar süreceği bilinebilir. Elde edilen bilgiler, organizasyonlar için kurumsallaşmaya giden yolda yararlı fikirler verecektir.

Bu çalışmada üç durum için oluşturulan senaryolar incelenmiştir. Senaryo 1 tüm süreçlerin kötü yönetildiği bir organizasyon olarak düşünülmüştür. Senaryo 2'de, Senaryo 1'e göre daha iyi bir yönetimin olduğu varsayılmıştır. Senaryo 3'te ise hali hazırda çok iyi bir süreç yönetimi performansı bulunmaktadır. Senaryo 1'de temsil edilen işletmelerde kurumsallaşmanın başarıya ulaşamayacağı gösterilmiştir. Senaryo 2'de ise kurumsallaşma düzeyinin iyileştiği ve ilerleyen yıllarda kurumsallaşmanın başarılı olduğu görülmüştür. Son olarak Senaryo 3'te ise kurumsallaşmanın çok hızlı bir şekilde gerçekleştiği ortaya çıkmaktadır. Senaryo 3, Senaryo 2'ye göre 10 zaman periyodu öncesinde (her periyot 1 yıla denk sayılmaktadır) istenilen kurumsallaşma düzeyine ulaşacaktır. Oluşturulan hipotetik kurumsallaşma senaryoları istenilen organizasyona uygulanabilecek ve mantıklı sonuçlar elde edilebilecektir.

Çalışmanın analiz kısmında bahsedildiği gibi süreç yönetimi, stratejik yönetim ve bilgi yönetimi kurumsallaşmayı etkileyen en önemli konseptlerdir. Bu üç süreç iyi yönetildiğinde kurumsallaşmada iyi seviyelere daha kısa sürede gelinebileceği anlaşılmaktadır. Ayrıca adam kayırma durumları kurumsallaşmayı en kötü etkileyen konsept olarak belirlenmiştir. Çünkü adam kayırma, organizasyonda huzursuzluğa neden olacak ve haksızlığa uğrayan diğer çalışanlar kurumsal bağlılık gösteremeyeceklerdir.

Kurumsallaşma gibi kompleks sistemler, BBH'nin esnek yapısı sayesinde kolayca modellenebilmekte ve gerçekçi sonuçlar alınabilmektedir. Bu çalışmada, organizasyonlar için kurumsallaşma eğilimi BBH yapısı kullanılarak incelenmiştir. Geliştirilen model

sayesinde organizasyonların yararlanabileceği teşvik edici sonuçlar elde edilmiştir. Geliştirilen model ile kurumsallaşma eğilimin belirlenmesi çeşitli düzeylerdeki tüm işletmeler için uygulanabilecektir. Gelecekteki çalışmalarda, uzmanların harita oluştururken fikir birliği sürecinde karar verme zorluğunun üstesinden gelmek için çok kriterli karar verme yöntemlerini BBH ile entegre etmek umut verici olarak görülmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeler Koordinatörlüğü tarafından 2017-50-01-029 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] L. Broom and P. Selznick, *Sociology: A Text with Adapted Readings*. Row, Peterson, 1955.
- [2] “Deming Prize.” [Online]. Available: https://www.juse.or.jp/deming_en/award/.
- [3] “Malcolm Baldrige National Quality Award (MBNQA) - ASQ.” [Online]. Available: <http://asq.org/learn-about-quality/malcolm-baldrige-award/overview/overview.html>.
- [4] “Model Criteria,” *EFQM*, 07-May-2013. [Online]. Available: <http://www.efqm.org/efqm-model/model-criteria>.
- [5] A. D. May, A. Lotfi, C. Langensiepen, K. Lee, and G. Acampora, “Human Emotional Understanding for Empathetic Companion Robots,” in *Advances in Computational Intelligence Systems*, Springer, Cham, pp. 277–285, 2017.
- [6] A. Nikas and H. Doukas, “Developing Robust Climate Policies: A Fuzzy Cognitive Map Approach,” in *Robustness Analysis in Decision Aiding, Optimization, and Analytics*, M. Doumpos, C. Zopounidis, and E. Grigoroudis, Eds. Springer International Publishing, pp. 239–263, 2016.
- [7] A. Amirkhani, E. I. Papageorgiou, A. Mohseni, and M. R. Mosavi, “A review of fuzzy cognitive maps in medicine: Taxonomy, methods, and applications,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 142, pp. 129–145, 2017.
- [8] R. Romero-Córdoba, J. A. Olivas, F. P. Romero, F. Alonso-Gonzalez, and J. Serrano-Guerrero, “An Application of Fuzzy Prototypes to the Diagnosis and Treatment of Fuzzy Diseases,” *Int. J. Intell. Syst.*, vol. 32, no. 2, pp. 194–210, 2017.
- [9] D. T. Sarabai and K. Arthi, “Efficient Breast Cancer Classification Using Improved Fuzzy Cognitive Maps with Csonn,” *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 11, no. 4, pp. 2478–2485, 2016.
- [10] E. I. Papageorgiou, J. Subramanian, A. Karmegam, and N. Papandrianos, “A risk management model for familial breast cancer: A new application using Fuzzy Cognitive Map method,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 122, no. 2, pp. 123–135, 2015.
- [11] J. Subramanian, A. Karmegam, E. Papageorgiou, N. Papandrianos, and A. Vasukie, “An integrated breast cancer risk assessment and management model based on fuzzy cognitive maps,” *Comput. Methods Programs Biomed.*, vol. 118, no. 3, pp. 280–297, 2015.
- [12] C. T. Chen and Y. T. Chiu, “A study of fuzzy cognitive map model with dynamic adjustment method for the interaction weights,” *International Conference on Advanced Materials for Science and Engineering (ICAMSE)*, pp. 699–702, 2016.
- [13] D. M. Case and C. D. Stylios, “Fuzzy Cognitive Map to model project management problems,” *Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, pp. 1–6, 2016.
- [14] K. Mls, R. Cimler, J. Vaščák, and M. Puheim, “Interactive evolutionary optimization of fuzzy cognitive maps,” *Neurocomputing*, vol. 232, pp. 58–68, 2017.
- [15] M. I. F. Ribeiro, F. A. F. Ferreira, M. S. Jalali, and I. Meidutė-Kavaliauskienė, “A fuzzy knowledge-based framework for risk assessment of residential real estate investments,” *Technol. Econ. Dev. Econ.*, vol. 23, no. 1, pp. 140–156, 2017.
- [16] F. A. F. Ferreira, J. J. M. Ferreira, C. I. M. A. S. Fernandes, I. Meidutė-Kavaliauskienė, and M. S. Jalali, “Enhancing knowledge and strategic planning of bank customer loyalty using fuzzy cognitive maps,” *Technol. Econ. Dev. Econ.*, pp. 1–17, 2017.
- [17] P. P. Groumpos, “Modelling Business and Management Systems Using Fuzzy Cognitive Maps: A Critical Overview,” *IFAC-Pap.*, vol. 48, no. 24, pp. 207–212, 2015.

- [18] P. Cano Marchal, J. G. Garcia, and J. G. Ortega, "Application of Fuzzy Cognitive Maps and Run-to-Run Control to a Decision Support System for Global Set-Point Determination," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, pp. 1–12, 2017.
- [19] G. P. Peter, A. P. Antigoni, and G. P. Vasileios, "A New Mathematical Modelling Approach for Viticulture and Winemaking Using Fuzzy Cognitive Maps," *IFAC-Pap.*, vol. 48, no. 24, pp. 15–20, 2015.
- [20] F. C. A. Pacilly, J. C. J. Groot, G. J. Hofstede, B. F. Schaap, and E. T. L. van Bueren, "Analysing potato late blight control as a social-ecological system using fuzzy cognitive mapping," *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 36, no. 2, p. 35, 2016.
- [21] J. M. Vasslides and O. P. Jensen, "Fuzzy cognitive mapping in support of integrated ecosystem assessments: Developing a shared conceptual model among stakeholders," *J. Environ. Manage.*, vol. 166, pp. 348–356, 2016.
- [22] R. Natarajan, J. Subramanian, and E. I. Papageorgiou, "Hybrid learning of fuzzy cognitive maps for sugarcane yield classification," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 127, pp. 147–157, 2016.
- [23] A. Konti and D. Damigos, "Exploring strengths and weaknesses of bioethanol production from bio-waste in Greece using Fuzzy Cognitive Maps," *Energy Policy*, vol. 112, pp. 4–11, 2018.
- [24] I. Mustapha, B. M. Ali, A. Sali, M. F. A. Rasid, and H. Mohamad, "An energy efficient Reinforcement Learning based Cooperative Channel Sensing for Cognitive Radio Sensor Networks," *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 35, pp. 165–184, 2017.
- [25] J. Kim, M. Han, Y. Lee, and Y. Park, "Futuristic data-driven scenario building: Incorporating text mining and fuzzy association rule mining into fuzzy cognitive map," *Expert Syst. Appl.*, vol. 57, pp. 311–323, 2016.
- [26] M. Amer, T. U. Daim, and A. Jetter, "Technology roadmap through fuzzy cognitive map-based scenarios: the case of wind energy sector of a developing country," *Technol. Anal. Strateg. Manag.*, vol. 28, no. 2, pp. 131–155, 2016.
- [27] G. Kyriakarakos, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "Design of a Fuzzy Cognitive Maps variable-load energy management system for autonomous PV-reverse osmosis desalination systems: A simulation survey," *Appl. Energy*, vol. 187, pp. 575–584, 2017.
- [28] V. Çoban and S. Ç. Onar, "Modelling Solar Energy Usage with Fuzzy Cognitive Maps," in *Intelligence Systems in Environmental Management: Theory and Applications*, C. Kahraman and İ. U. Sari, Eds. Springer International Publishing, pp. 159–187, 2017.
- [29] T. C. Kahveci, "The institutionalization and the enterprise modeling in the manufacturing firms," Sakarya Üniversitesi, 2007.
- [30] P. Selznick, "Institutionalism 'Old' and 'New,'" *Adm. Sci. Q.*, vol. 41, no. 2, p. 270, 1996.
- [31] E. Karpuzoğlu, "Aile Şirketlerinin Sürekliliğinde Kurumsallaşma," *Istanb. Kültür Üniversitesi*, vol. 1, pp. 42–53, 2004.
- [32] J. R. Kimberly, "Issues in the Creation of Organizations: Initiation, Innovation, and Institutionalization," *Acad. Manage. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 437–457, 1979.
- [33] İ. Fındıkçı, *Aile Şirketleri*. 2014.
- [34] B. Kosko, "Fuzzy cognitive maps," vol. 24, pp. 65–75, 1986.
- [35] R. Axelrod, Ed., *Structure of Decision: The Cognitive Maps of Political Elites*. Princeton University Press, 1976.
- [36] E. S. Vergini and P. P. Groumpos, "A new conception on the Fuzzy Cognitive Maps method," *IFAC-Pap.*, vol. 49, no. 29, pp. 300–304, 2016.
- [37] A. K. Tsadiras, "Comparing the inference capabilities of binary, trivalent and sigmoid fuzzy cognitive maps," *Inf. Sci.*, vol. 178, no. 20, pp. 3880–3894, 2008.
- [38] E. I. Papageorgiou, A. T. Markinos, and T. A. Gemtos, "Fuzzy cognitive map based approach for predicting yield in cotton crop production as a basis for decision support system in precision agriculture application," *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 4, pp. 3643–3657, 2011.
- [39] E. I. Papageorgiou, "A new methodology for Decisions in Medical Informatics using fuzzy cognitive maps based on fuzzy rule-extraction

techniques,” *Appl. Soft Comput.*, vol. 11, no. 1, pp. 500–513, 2011.

[40] U. Özesmi and S. Özesmi, “A Participatory Approach to Ecosystem Conservation: Fuzzy Cognitive Maps and Stakeholder Group Analysis in Uluabat Lake, Turkey,” *Environ. Manage.*, vol. 31, no. 4, pp. 0518–0531, 2003.

[41] J. de A. Sánchez and A. T. Gómez, “Applications of Fuzzy Regression in Actuarial Analysis,” *J. Risk Insur.*, vol. 70, no. 4, pp. 665–699, 2003.

[42] Z. Sen, *Fuzzy Logic and Hydrological Modeling*. CRC Press, 2009.

[43] P. P. Groumpos, “Fuzzy cognitive maps: Basic theories and their application to complex systems,” in *Fuzzy cognitive maps*, Springer, pp. 1–22, 2010.

[44] P. Chytas, M. Glykas, and G. Valiris, “Software reliability modelling using fuzzy cognitive maps,” in *Fuzzy Cognitive Maps*, Springer, pp. 217–230, 2010.

[45] G. Caruso, C. Scartascini, and M. Tommasi, “Are we all playing the same game? The economic effects of constitutions depend on the degree of institutionalization,” *Eur. J. Polit. Econ.*, vol. 38, pp. 212–228, 2015.

[46] D. Safina, “Favouritism and Nepotism in an Organization: Causes and Effects,” *Procedia Econ. Finance*, vol. 23, pp. 630–634, 2015.

[47] Ö. Uygun, T. Canvar Kahveci, H. Taşkın, and B. Piriştine, “Readiness assessment model for institutionalization of SMEs using fuzzy hybrid MCDM techniques,” *Comput. Ind. Eng.*, vol. 88, pp. 217–228, 2015.

[48] E. F. Erkan, “Bulanık bilişsel haritalama yöntemiyle kurumsallaşma düzeyinin analizi,” Sakarya Üniversitesi, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 26.08.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 07.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.336176	

Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde uygulamalı mühendislik deneyimi modeli ve öğrenciler üzerindeki etkileri

Gültekin Çağıl^{*1}, Merve Cengiz Toklu²

ÖZ

Dünya’da ve Türkiye’de, üniversite-sanayi işbirliği kapsamında çeşitli işbirliği faaliyetleri sürdürülmektedir. Uygulamalı eğitim modeli bu faaliyetlerin başında gelmektedir ve bu model üniversiteler tarafından üretilen teorik bilginin gerçek dünya problemlerinde kullanılmasını amaçlar. Bununla birlikte, uygulamalı eğitim programına katılan öğrencilerin gelecek kararı, özgüven, mesleki öz yeterlilik ve kaygı gibi konularda olumlu bir şekilde ilerlemeleri beklenmektedir. Bu çalışmada, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi tarafından geliştirilen ve ilk uygulaması Endüstri Mühendisliği bölümünde gerçekleştirilen Uygulamalı Mühendislik Deneyimi Eğitimi (UMDE) programı açıklanmıştır. Aynı zamanda, UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasındaki fark istatistiksel olarak araştırılmıştır. Araştırma sonucunda UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında gelecek kararı, mesleki öz yeterlilik ve kaygı seviyelerinde istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: üniversite sanayi işbirliği, uygulamalı eğitim, ortak eğitim, uygulamalı mühendislik deneyimi eğitimi (UMDE)

Applied engineering experience model in Sakarya University Industrial Engineering department and effects on students

ABSTRACT

In the world and Turkey, various cooperation activities are carried out within the scope of university-industry cooperation. The Applied education model, is at the beginning of these activities and this model aims to use the theoretical knowledge produced by universities in real world problems. In addition to this, it is expected that the students participating in the applied education program will progress positively on issues such as future decision, self-confidence, occupational self-efficacy and anxiety. In this study, Applied Engineering Experience Education (UMDE) program developed by the Faculty of Engineering of Sakarya University and first implemented in the Department of Industrial Engineering is explained. On the

* Corresponding Author

¹ Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya, cagil@sakarya.edu.tr

² Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya, mtoklu@sakarya.edu.tr

other hand, the difference between the students who participated and who did not participate in the UMDE program was investigated statistically. As a result of the study, it was determined that there is a statistically significant difference in the level of future decision, occupational self-efficacy and anxiety among the students who participated in and did not participate in the UMDE program.

Keywords: University industry collaboration, applied education, co-operative education, applied engineering experience education

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknoloji üretme, yenileşim ve araştırma-geliştirmeye yönelik faaliyetlerin etkin yönetimi gelişmekte olan ülkelerin amaçları arasında büyük öneme sahiptir. Bu amaca hizmet eden üniversite-sanayi işbirliği yeni bir kavram değildir. Üniversite sanayi işbirliğinin temelleri kendi teknolojisini üreten ülkelerde yıllar önce atılmış ve sürdürülebilirliği sağlanmıştır [1]. Üniversite-sanayi işbirliği faaliyetlerinden birisi de uygulamalı eğitimidir. Uygulamalı eğitim modelinde öğrenciler mezun olmadan önce iş deneyimi kazanmakta, bununla birlikte üniversite ve sanayi birlikteliğini sağlayarak endüstrilerin problemlerine akademik zeminde çözüm bulunması konusunda aracı olmaktadır. Bu sayede üniversite-sanayi işbirliği; bölümlerdeki ders müfredatının güncel konular ile değiştirilmesi, sanayi projeleri, danışmanlıklar, lisans ve lisansüstü tezlerin uygulamasının gerçekleştirilmesi gibi konularda devam edebilmektedir [2]. Mühendislik eğitiminde öğrencilerin mezun olduktan sonra üstlenecekleri görev ve sorumluluklar açısından hazırlanmaları için teorik eğitimin yanı sıra pratik eğitime de gereken önem verilmelidir [3]. Kısa dönemli stajlar bu noktada yeterli olmamaktadır. Öğrencinin en az bir dönemini tam zamanlı olarak işletmelerde, ilgili alanda çalışarak geçirmesi hem öğrenciye hem de potansiyel insan kaynaklarının tespiti açısından sanayiye büyük yarar sağlamaktadır. Özellikle mühendislik eğitiminde uygulamalı eğitim modelinin önemi ve gerekliliği hem üniversitelerde hem de ülkelerin eğitim politikalarında önem kazanmıştır. Türkiye’de de devlet politikaları ile bu konunun önemi vurgulanmakta ve teşvik sağlanmaktadır.

Bu çalışmada, Uygulamalı Mühendislik Deneyimi Eğitimi (UMDE) programı kapsamında işletmelerde aday mühendis olarak çalışan öğrenciler ile UMDE programına katılmayan öğrenciler arasında özgüven, kaygı, öz yeterlilik ve gelecek kararı konularında farklılık olup

olmadığının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaca yönelik olarak, 2016-2017 eğitim-öğretim yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’nde 8. yarıyılıda olan toplam 100 Endüstri Mühendisi adayına beş dereceli Likert tipinde 26 sorudan oluşan anket uygulanmıştır. Aday mühendisler, UMDE programına katılım durumlarına göre gelecek kararı, özgüven, mesleki öz yeterlilik ve kaygı düzeyi değişkenleri bakımından incelenmiştir.

2. UYGULAMALI (ORTAK) EĞİTİM MODELİ (APPLIED-COOPERATIVE EDUCATION MODEL)

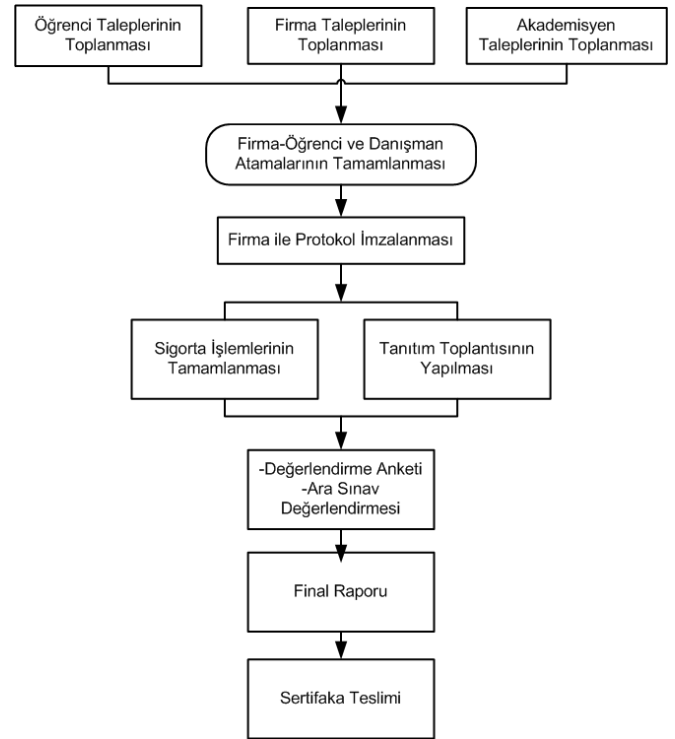
Uygulamalı (ortak) eğitim modeli yeni bir model olmayıp Dünya’da pek çok üniversitede yıllardır uygulanmaktadır. Uygulamalı eğitim modeli 1906 yılında Cincinnati Üniversitesi’nde, 1957 yılında Kanada’da Waterloo Üniversitesi’nde uygulanmaya başlanmıştır [4]. Türkiye’de ilk uygulama, 2005 yılında TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi’nde başlamıştır. Uygulamalı eğitim modeli aynı ana amaç çatısı altında, ülkelerin dinamiklerine göre ülkeden ülkeye ya da üniversitelerin iç politikalarına göre uygulamada farklılıklar gösterebilmektedir. Uygulamalı eğitim kapsamında; Sakarya Üniversitesi’nde, meslek yüksekokullarında 3+1 modeli, Teknoloji Fakültesinde 7+1 modeli ve Mühendislik Fakültesinde UMDE modeli uygulanmaktadır. Gaziantep Üniversitesi, Manisa Celal Bayar Üniversitesi ve Toros Üniversitesi “İntörn Mühendislik” programı adı altında bu çalışmayı sürdürmektedir. Namık Kemal Üniversitesi de 2017-2018 eğitim-öğretim yılında Gıda Mühendisliği bölümünde intörn mühendislik programını uygulamaya başlamıştır. Uygulamalı eğitim modeli ile ilgili olarak literatür incelendiğinde modeli anlatan ve faydalarından bahsedilen çalışmalar mevcuttur. Blair ve ark. [5] Mississippi Üniversitesi’nde mühendislik eğitimi alan, uygulamalı eğitim programına katılan ve katılmayan öğrencileri genel not ortalaması, mezuniyet süresi ve iş başı başlangıç maaş

miktarları kriterleri açısından inceleyerek modelinin etkilerini ortaya koymuşlardır. Weisz ve Smith [6] uygulamalı eğitimin faydalarından bahsederken aynı zamanda bu modelin akademisyenler açısından; tüm iş yerlerini kontrol etmenin getirdiği iş yükü, yeterince finansman sağlanmaması, akademik terfi süreçlerine yansımaması gibi zorluklarını da tartışmışlardır. Haddara ve Skanes [4] çalışmalarında, Kuzey Amerika'da uygulamalı eğitimin son 100 yıldaki gelişimi incelemiştir. Geleneksel eğitime göre ortak eğitimin öğrenciye, işverene ve kurumlara olan faydaları açıklanmıştır. Sarıbyık [7], Sakarya Üniversitesi meslek yüksekokullarında uygulanan 3+1 eğitim modelini anlatarak modelin öğrenciye, sektöre, öğretim elemanlarına ve topluma olan yararlarından bahsetmiştir. Erden Özsoy [8] çalışmasında mesleki eğitim ve istihdam ilişkisi üzerinde yoğunlaşarak mesleki eğitim sisteminin kalitesinin artırılması ile mezunların işgücü piyasasında ihtiyaç duyulan beceri ve yeterliliklere sahip olmasından bahsederek, mesleki eğitime ilişkin sorunlara getirilebilecek çözüm önerilerini de sıralamıştır. Uygulamalı eğitim modelinin, Yüksek Öğretim Kurumu'nun teşviki ve politikaları ile Türkiye'de pek çok üniversite ve fakültede uygulanma zorunluluğu getirilmesi planlanmaktadır.

3. UYGULAMALI MÜHENDİSLİK DENEYİMİ EĞİTİMİ (APPLIED ENGINEERING EXPERIENCE EDUCATION)

UMDE programı, 2013-2014 eğitim-öğretim yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi tarafından Endüstri Mühendisliği bölümünde pilot uygulama olarak başlatılmış olup, 2016-2017 eğitim-öğretim yılından itibaren Mühendislik Fakültesinin diğer bölümlerinde de uygulanmaktadır. UMDE programı, 4. sınıf öğrencileri tarafından 7. veya 8. yarıyıldan seçmeli ders kapsamında tercih edilmekte olup, üç teknik seçmeli derse eşdeğer sayılmaktadır. UMDE programı ile öğrencilerin (aday mühendislerin) bir dönem boyunca haftanın ilk dört iş günü ilgili işletmelerde çalışmaları amaçlanmaktadır. UMDE programı kapsamında her dönem firmaların, öğrencilerin ve akademisyenlerin talepleri belirlenmektedir. Dönem başlamadan önce öğrencilerin; çalışmak istedikleri firma ya da sektör talebi, eğer önereceği bir firma var ise önerisi, not ortalamaları, İngilizce dil seviyeleri ve mesleki özellikleri belirlenir. Bu işlem ile

eşzamanlı olarak firmaların talepleri de toplanır. Talep ettikleri aday mühendis sayısı, aday mühendisleri istihdam edecekleri bölümler ve talep ettikleri aday mühendislerin mesleki özellikleri belirlenir. Program kapsamında her öğrencinin akademik danışmanı mevcuttur. Akademisyenlerin talepleri de belirlenir. Alınan talepler değerlendirilerek, dönem başında firma-öğrenci-akademik danışman atamaları gerçekleştirilir ve firmalar ile protokol imzalanır. İlgili dönemin ilk haftasında sigorta işlemleri ve UMDE tanıtım toplantısı yapılmaktadır. Öğrenciler dönemin 2. haftasından itibaren işletmelerde aday mühendis sıfatı ile çalışmaya başlamaktadırlar. Öğrencilerin çalışmaları firma ziyaretleri ile akademik danışmanları tarafından takip edilir. Öğrencilere yapılan değerlendirme anketi ile firmadaki çalışmaları ve varsa şikayetleri değerlendirilir. UMDE programı sürecinde aday mühendislerin durumu danışmanları tarafından ara raporlar aracılığı ile değerlendirilir. UMDE programı tamamlandığında ilgili akademik danışman ve firma danışmanı tarafından değerlendirme notu verilir. Başarılı olan aday mühendise başarı belgesi takdim edilir (Şekil 1).



Şekil 1: UMDE programının işleyişi [2] (The process of UMDE program)

Sakarya Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde UMDE programına katılım istatistikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Bu verilere göre 2016-2017 eğitim-öğretim yılında toplam 134 öğrenci programa katılım sağlamıştır. Ayrıca 2017-2018 bahar yarıyılında 42 öğrenci

UMDE programına katılmak için başvuruda bulunmuştur.

Tablo 1. UMDE programı 2013-2018 yılları arası katılım istatistikleri (Participation statistics for UMDE program between 2013-2017)

Dönem	İşletme Sayısı	Aday Mühendis Sayısı
2013-2014 Güz	44	57
2014-2015 Güz	48	87
2014-2015 Bahar	22	26
2015-2016 Güz	30	59
2015-2016 Bahar	29	65
2016-2017 Güz	33	76
2016-2017 Bahar	32	58
2017-2018 Güz	54	127

4. UYGULAMA (APPLICATION)

Bu çalışma kapsamında; Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği

bölümünde 2016-2017 eğitim-öğretim yılında eğitim gören son sınıf öğrencilerine anket çalışması uygulanmıştır. Gelecek kararı, özgüven, mesleki öz yeterlilik ve kaygı ana başlıkları altında toplanan 26 anket sorusu Tablo 2’de verilmiştir.

Çalışmada UMDE programının etkilerini ölçmenin yanısıra programın iyileştirmeye açık alanlarının belirlenmesi ve bu alanlara yönelik faaliyetlerin düzenlenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle değerlendirme kriterleri programın pilot uygulayıcısı olan ve 2013-2014 eğitim-öğretim yılından itibaren programı başarılı bir şekilde sürdüren Endüstri Mühendisliği bölümü öğretim üyelerine ve öğrencilerine danışarak belirlenmiştir. Bununla birlikte literatür araştırmasından da faydalanılmış kriterler yine program uygulayıcılarına danışarak son haline getirilmiştir.

Tablo 2. Anket soruları (Survey questions)

Sıra	Ana Başlık	Sorular
1	Gelkar1	İş başvurusunda seçici davranıp kriterlerime uygun işletmelere başvuracağım
2	Gelkar2	Başvuracağım işletmede hangi pozisyonda çalışacağım benim için önemli değildir
3	Gelkar3	Hangi sektörde çalışmak istediğime karar verdim
4	Gelkar4	Hangi departmanda çalışmak istediğime karar veremiyorum
5	Oz1	Karmaşık problemleri kavrayıp çözebilirim
6	Oz2	Görevimle ilgili sorumlulukları tek başıma alabilirim
7	Oz3	Zaman zaman kendimi ifade etmekte zorlanırım
8	Mesoz1	Günlük yaşamda organizasyonların süreçlerini incelerim (Market, fırın, banka, vs.)
9	Mesoz2	Girdiğim yerlerde organizasyon yapısı ve süreçleri dikkatimi çekmez
10	Mesoz3	Karşılaştığım kalite problemlerini, kusurlarını fark edemem
11	Mesoz4	Girdiğim işletmelerde sistemsel problemleri tespit edip çözümler üretebilirim
12	Mesoz5	Aldığım ürünlerde problem çıktığında müşteri yetkilileriyle iletişime geçerim
13	Mesoz6	Rapor hazırlayamam
14	Mesoz7	Endüstri mühendisinin ne iş yaptığını örnek olaylarla anlatabilirim
15	Mesoz8	Teknik mühendislik gereken problemleri çözmeye pratik davranabiliyorum
16	Mesoz9	Olayları/problemleri zihnimde sistematik bir şekilde sıralamakta zorlanıyorum
17	Mesoz10	Edindiğim teorik bilgileri çalışacağım işletmede rahatlıkla uygulayabilirim
18	Kaygı1	Mezun olduktan sonra rahatlıkla iş bulabilirim
19	Kaygı2	Teorik bilgilerimi iş yaşantısına kolaylıkla uygulayabilirim
20	Kaygı3	Çalışacağım işletmede mesleki sorulara cevap verememekten korkuyorum
21	Kaygı4	Bir işletmede çalışıyor olma düşüncesi kendimi kötü hissettiriyor
22	Kaygı5	Çalıştığım süreci (veya birimi) kontrol edememekten korkuyorum
23	Kaygı6	Mesleğimden elde edeceğim gelirin yetersiz olacağından korkuyorum
24	Kaygı7	Mesleğimde kendimi geliştirebileceğim olanakları bulamamaktan korkuyorum
25	Kaygı8	Meslektaşlarımın bilgimi yetersiz bulmasından korkuyorum
26	Kaygı9	İşletmenin benden beklediği mesleki özellikleri taşıyamamaktan korkuyorum

4.1. Verileri Toplama Aracı (Data Collection Tool)

Çalışmadaki veriler, UMDE programının öğrenciler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla hazırlanan anket ile elde edilmiştir. Bu makalede yer alan anket çalışmasının örnekleme, 2016-2017 eğitim-öğretim yılı bahar yarıyılında, Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği bölümü 8. yarıyılıda eğitim görmekte olan öğrencilerle sınırlıdır. Anket çalışması için öncelikle örneklem büyüklüğü tespit edilmiştir. Bu amaç doğrultusunda evren büyüklüğü bilindiğinde kullanılabilir Denklem (1) dikkate alınmıştır.

$$n = \frac{N(p \times q) \times Z^2}{(N - 1) \times \varepsilon^2 + (p \times q) \times Z^2} \quad (1)$$

N: Evren büyüklüğü

p: Olayın gerçekleşme olasılığı

q = 1-p: Olayın gerçekleşmeme olasılığı

Z: Anlamlılık düzeyinin standart normal dağılım tablosundaki değeri

ε: Örneklem hatası

$$n = \frac{300(0,45 \times 0,55) \times 1,96^2}{(300 - 1) \times 0,1^2 + (0,45 \times 0,55) \times 1,96^2} \cong 73$$

300 kişiden oluşan bir evren için %5 anlamlılık düzeyinde yaklaşık olarak en az 73 kişilik bir örnek oluşturmak gerekmektedir. Bu hesaplama ile evreni temsil edecek en az örnek sayısı belirlenmiştir. Çalışmada, güvenilirliği arttırmak için tespit edilen sayıdan daha fazla olarak 100 kişiye anket uygulanmıştır.

Endüstri Mühendisi adayı öğrencilerden beşli Likert tipinde ölçeklendirilen anket maddelerinin 1 ile 5 arasında puan vermeleri istenmiştir. Tablo 3'e göre 1, "kesinlikle katılmıyorum" ifadesinin karşılığı olurken 5, "kesinlikle katılıyorum" ifadesine karşılık gelmektedir. Negatif sorularda Likert ölçeği ters olarak uygulanmıştır.

Tablo 3. Değerlendirilmesi ölçeği (Evaluation scale)

Ağırlık	Seçenek
1	Kesinlikle Katılmıyorum
2	Katılmıyorum
3	Kararsızım
4	Katılıyorum
5	Kesinlikle Katılıyorum

Likert ölçeği, kişinin tek bir objeye karşı gösterdiği tutuma ilişkili olarak hazırlanmış cümleleri içerir ve cevaplayıcılar her bir cümleyi onaylama derecesini göstermek için iki, üç, dört,

beş, altı ya da yedi seçeneği olan ölçekte kendisine en yakın olan ölçeği seçer [9]

4.2. Anket Sonuçları (Survey Results)

Ankete katılan öğrencilerin dağılımı Tablo 4'te verilmiştir. Buna göre ankete katılan 100 öğrencinin %39'u UMDE programına katılmamış olup, %61'i UMDE programına katılmıştır.

Tablo 4. UMDE programına katılım oranı (UMDE program participation rate)

UMDE Programına Katılım Durumu	Frekans	Yüzde
UMDE Programına Katılmadı	39	39,0
UMDE Programına Katıldı	61	61,0
Toplam	100	100,0

Yapılan her çalışmada güvenilirlik kavramının üzerinde durmak gerekir. Güvenilirlik, bir çalışmadaki tüm soruların birbirleri ile olan tutarlılığını test eder ve kullanılan ölçeğin problemi yansıtma derecesini ifade eder. Bu çalışmanın güvenilirliği Cronbach's Alfa (α) modeli ile ölçülmüştür. Cronbach's Alfa (α) katsayısının 0,8'den yüksek olması durumunda çalışma yüksek derecede güvenilir olarak yorumlanır [10]. Sürekli, aralıklı ya da ardışık 4-5 seçenekli cevaplar içeren n sorunun yer aldığı bir çalışmanın ölçme gücünü, yeterliliğini ve güvenilirliğini ölçen bu katsayı Denklem (2) ile hesaplanır [11];

$$\alpha = \frac{n}{n - 1} \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n S_i^2}{S_p^2} \right] \quad (2)$$

n = ölçekteki soru sayısı

S_i^2 = her bir sorunun varyansı

S_p^2 = genel varyans

Tablo 5'te gösterildiği gibi bu çalışmanın Cronbach's Alfa (α) katsayısı 0,831 olarak belirlenmiştir. Bu sonuca göre çalışma ölçeği yüksek derecede güvenilirdir.

Tablo 5. Cronbach's Alpha değeri(Cronbach's Alpha value)

Cronbach's Alpha	N of Items
,831	26

Güvenilirlik analizi ile Cronbach's Alfa katsayısı hesaplandıktan sonra anket soruları arasındaki korelasyon katsayılarının hesaplanması ve düşük korelasyonlu soruların anketten çıkartılması gerekir. Böylece anketin içsel tutarlılığının artması beklenir. Yapılan çalışmada sorular tek tek incelenerek, anketten çıkarılması durumunda Cronbach's Alfa katsayısının artmayacağı

belirlenmiştir. Bu nedenle hiçbir soru çalışmadan çıkartılmamıştır.

Tablo 6’da katılımcıların verdikleri cevaplara göre her bir sorunun ortalaması, modu ve medyanı belirlenmiştir. Aritmetik ortalamadan yola çıkarak yorum yapmak istenirse düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 değer aralığı belirlenmiştir. Bu değer aralıkları ise en yüksek 5 ve en düşük 1 değerlerine göre $(5-1)/3=1,33$ olarak tespit edilmiştir. Buna göre 1 ve 2,33 arası düşük, 2,34

ve 3,66 arası orta, 3,67 ve 5,00 arası ise yüksek düzey şeklinde yorumlanmıştır. Örneğin gelkar2 kodlu soruda öğrencilerin iş başvurusu yapacağı işletmede hangi pozisyonda çalışacaklarına verdikleri önem derecesi sorgulanmıştır. UMDE programına katılan öğrencilerin bu konuya verdikleri önem derecesi 4,33 ile yüksek düzey olarak yorumlanırken UMDE programına katılmayan öğrenciler için 2,62 olan değer ile orta önem seviyesine sahip olarak tespit edilmiştir.

Tablo 6. Katılımcıların verdikleri cevaplara göre istatistikler (Statistics based on responses of participants)

UMDE Katılım Durumu	Anket Sorusu	N	Ortalama	Medyan	Mod	UMDE Katılım Durumu	Anket Sorusu	N	Ortalama	Medyan	Mod
UMDE Programına Katılmadı	gelkar1	39	3,54	4,00	4,00	UMDE Programına Katılmadı	kaygı1	39	3,10	3,00	3,00
	gelkar2	39	2,62	3,00	3,00		kaygı2	39	2,10	2,00	2,00
	gelkar3	39	3,44	3,00	3,00		kaygı3	39	3,10	3,00	3,00
	gelkar4	39	2,28	2,00	2,00		kaygı4	39	2,49	2,00	2,00
UMDE Programına Katıldı	gelkar1	61	3,85	4,00	4,00		kaygı5	39	3,56	4,00	4,00
	gelkar2	61	4,33	4,00	4,00		kaygı6	39	3,15	3,00	3,00
	gelkar3	61	3,38	3,00	3,00		kaygı7	39	3,10	3,00	3,00
	gelkar4	61	4,02	4,00	4,00		kaygı8	39	4,10	4,00	4,00
UMDE Programına Katılmadı	mesoz1	39	4,03	4,00	4,00		kaygı9	39	3,10	3,00	3,00
	mesoz2	39	4,05	4,00	4,00	kaygı1	61	3,11	3,00	3,00	
	mesoz3	39	3,92	4,00	4,00	kaygı2	61	4,00	4,00	4,00	
	mesoz4	39	3,79	4,00	4,00	kaygı3	61	3,30	3,00	2,00	
	mesoz5	39	3,92	4,00	4,00	kaygı4	61	4,34	4,00	5,00	
	mesoz6	39	3,85	4,00	4,00	kaygı5	61	3,82	4,00	4,00	
	mesoz7	39	4,18	4,00	4,00	kaygı6	61	3,38	3,00	4,00	
	mesoz8	39	3,62	4,00	4,00	kaygı7	61	3,03	3,00	2,00	
	mesoz9	39	3,67	4,00	4,00	kaygı8	61	3,75	4,00	4,00	
	mesoz10	39	2,44	3,00	3,00	kaygı9	61	3,38	3,00	4,00	
UMDE Programına Katıldı	mesoz1	61	4,13	4,00	4,00	UMDE Programına Katılmadı	oz1	39	3,64	4,00	4,00
	mesoz2	61	4,26	4,00	4,00	oz2	39	3,74	4,00	4,00	
	mesoz3	61	3,89	4,00	4,00	oz3	39	2,95	3,00	2,00	
	mesoz4	61	3,77	4,00	4,00	UMDE Programına Katıldı	oz1	61	3,77	4,00	4,00
	mesoz5	61	4,07	4,00	4,00	oz2	61	4,07	4,00	4,00	
	mesoz6	61	4,18	4,00	4,00	oz3	61	2,80	3,00	2,00	
	mesoz7	61	4,44	4,00	4,00						
	mesoz8	61	3,51	4,00	4,00						
	mesoz9	61	3,85	4,00	4,00						
	mesoz10	61	4,18	4,00	4,00						

Parametrik testlerde değerlerin normal dağıldığı varsayılır. Ancak parametrik olmayan testlerde böyle bir zorunluluk yoktur. Parametrik hipotez testlerinin varsayımlarının karşılanmadığı durumlarda parametrik olmayan testler uygulanabilir. Parametrik testlerin varsayımları; verilerin eşit aralıklı (interval) olması, verilerin normal dağılıma uyması ve grup varyanslarının homojen bir dağılım göstermesidir. Bu üç varsayımdan en az birisinin ihlal edilmesi durumunda Mann-Whitney U (MW) testi kullanılabilir. Bu çalışmada, bağımsız iki örnek grubunun arasındaki farklılıkların analiz edilmesi amaçlanmıştır. MW testi iki örnek t testinin parametrik olmayan alternatifidir. MW Testi

uygulamak için veriler, 1. ve 2. toplumlardan rastgele alınmış benzer ölçekli örnekler olmalıdır. Bu test gerçek gözlemler yerine sıralama puanlarını kullanır [11]. MW testinde değişkenlerden en az birinin ordinal olması gerekmekte olup çalışma bu kurala uymaktadır. Bu nedenle çalışmada MW testi yöntemi tercih edilmiştir.

MW testi aralıksız ölçülen iki (bağımsız) grup arasındaki farklılıkları test eder. İki grubun ortalamalarının karşılaştırılması yerine medyanlarını karşılaştırır. Değerler sıralı hale dönüştürüldüğü için değerlerin mevcut dağılımlarının önemi yoktur [10].

Bu çalışmada MW testi için hipotez aşağıdaki şekilde kurulmuştur;

Ho: N1 ve N2 hacimli örneklerin medyanları eşittir.

H1: N1 ve N2 hacimli örneklerin medyanları eşit değildir.

Tablo 7’de yer alan gelecek kararları ana başlığındaki 4 soru %95 güven aralığında MW testi ile incelendiğinde gelkar2 ve gelkar4 kodlu sorularda UMDE programına katılmış öğrenci ile katılmamış öğrenci arasında anlamlı bir fark

olduğu belirlenmiştir. UMDE programına katılan öğrenciler mezuniyetleri sonrası iş başvurusunda bulunurken hangi departmanda ve hangi pozisyonda çalışacağı konusunda daha bilinçli olarak karar vereceği gözlemlenmiştir.

Tablo 7’de özgüven ile ilgili olarak sorulan 3 soru %95 güven aralığında MW testi ile incelendiğinde; karmaşık problemleri kavrama, sorumluluk bilinci ve kendini ifade etme konularında UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında anlamlı bir farklılık olmadığı belirlenmiştir.

Tablo 7. Gelecek kararı, özgüven, mesleki özyeterlilik ve kaygı ana başlığına ait test sonuçları - Test results of the main head of the future decision, self-confidence, self-efficacy and anxiety

Ho Hipotezi	Test	Gösterge	Karar
Gelkar1 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,122	Ho Hipotezi Kabul
Gelkar2 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,000	Ho Hipotezi Ret
Gelkar3 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,794	Ho Hipotezi Kabul
Gelkar4 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,000	Ho Hipotezi Ret
Oz1 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,265	Ho Hipotezi Kabul
Oz2 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,055	Ho Hipotezi Kabul
Oz3 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,519	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz1 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,749	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz2 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,116	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz3 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,937	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz4 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,868	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz5 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,349	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz6 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,015	Ho Hipotezi Ret
Mesoz7 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,079	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz8 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,494	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz9 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,242	Ho Hipotezi Kabul
Mesoz10 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,000	Ho Hipotezi Ret
Kaygı1 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,954	Ho Hipotezi Kabul
Kaygı2 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,000	Ho Hipotezi Ret
Kaygı3 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,408	Ho Hipotezi Kabul
Kaygı4 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,000	Ho Hipotezi Ret
Kaygı5 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,121	Ho Hipotezi Kabul
Kaygı6 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,381	Ho Hipotezi Kabul
Kaygı7 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,786	Ho Hipotezi Kabul
Kaygı8 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,076	Ho Hipotezi Kabul
Kaygı9 kriterine göre UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında fark yoktur	MW	0,187	Ho Hipotezi Kabul

*Anlamlılık Düzeyi 0,05

Tablo 7’deki mesleki öz yeterlilik başlığı altında sorulan sorular karşılaştırıldığında mesoz6 ve mesoz10 kodlu sorularda UMDE programına

katılmış öğrenci ile katılmamış öğrenci arasında anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca göre UMDE programına katılmış öğrencilerin mesleki raporları hazırlama ve teorik bilgileri

gerçek dünya problemlerine aktarma konusunda UMDE programına katılmamış öğrencilere göre daha fazla özgüvene sahip olduğu belirlenmiştir.

Mezun olacak öğrencilerin taşıdığı kaygılara yönelik sorular incelendiğinde, kaygı2 ve kaygı4 kodlu sorularda UMDE programına katılmış öğrenci ile katılmamış öğrenci arasında anlamlı bir fark olduğu belirlenmiştir. Bu sonuca göre UMDE programına katılmış öğrencilerin teorik bilgileri iş hayatında uygulama ve bir işletmede çalışıyor olma düşüncesi konularında kaygı yaşamadığı tespit edilmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu araştırmada, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde öğrenim görmekte olan aday Endüstri Mühendislerinin UMDE programı sonucunda gelecek kararı, özgüven, mesleki öz yeterlilik ve kaygı düzeylerinin ortaya konulması ve programın öğrencilere kazandırdığı fayda çıktılarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda 2016–2017 eğitim-öğretim yılında, 8. yarıyılıda olan 100 Endüstri Mühendisi adayı ile bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, anketi oluşturan dört ana maddeye bakıldığında özgüven başlığı altında sorulan sorularda UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında anlamlı bir farklılık olmadığı belirlenmiştir. Gelecek kararı, mesleki öz yeterlilik ve kaygı konularında ise aşağıda belirtilen konularda anlamlı bir farklılık tespit edilmiştir.

- Mesleki raporları hazırlama ve teorik bilgileri gerçek dünya problemlerine aktarma
- Teorik bilgileri iş hayatında uygulama konusunda kaygı yaşama
- Bir işletmede çalışıyor olma düşüncesi konusunda kaygı yaşama
- Mezuniyet sonrası iş başvurusunda bulunurken hangi departmanda ve hangi pozisyonda çalışacağı konusunda seçici ve bilinçli olma

Yapılan çalışma kapsamında, UMDE programına katılan ve katılmayan öğrenciler arasında yukarıda özetlenen farklar tespit edilmiştir. Programın amacı doğrultusunda UMDE programı kazanımlarını arttırmak için program iyileştirilebilir. Örneğin, programa katılan

öğrencilerin, özgüven başlığı altında yer alan “Karmaşık problemleri kavrayıp çözebilirim” ifadesini yüksek puanlarla değerlendirmesi için UMDE programına katılan öğrencilerin tasarım ya da bitirme çalışmalarının aynı işletmedeki mevcut bir problem üzerinde çalışması ile sağlanabilir. İlgili işletmenin mevcut bir problemine çözümler geliştirmesi ve bunun uygulanabilirliğini görmesi ile öğrencilerin karşılaştıkları problemleri çözebilme konusunda özgüvenli olmaları sağlanabilir.

Bu çalışma ışığında yapılacak sonraki çalışmalarda, anketin UMDE programına katılan tüm Mühendislik Fakültesi bölümleri kapsamında uygulanarak bölümler arası farklılık olup olmadığı tespit edilebilir. Ayrıca aynı öğrenci grubu ele alınarak UMDE programına katılmadan önce ve katıldıktan sonraki durumları belirlenerek anlamlı bir farklılık olup olmadığı belirlenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] G. Doğan and B. Üstün, “Türkiye’de Üniversite Sanayi İşbirliğini Etkinleştirme Yolları,” in *VII.Ulusal Uçak,Havacılık ve Uzay Mühendisliği Kurultayı*, 2013, pp. 227–232.
- [2] M. Cengiz Toklu, “Yüksek Öğretim Kurumlarında Ortak Eğitim Modeli Ve Bir Uygulaması,” in *International Conference on Quality in Higher Education (ICQH)*, 2016, pp. 1089–1092.
- [3] M. T. Gençoğlu and M. Cebeci, “Türkiye’de Mühendislik Eğitimi ve Öneriler,” in *Mühendislik-Mimarlık Eğitimi Sempozyumu*, 1999, pp. 73–80.
- [4] M. Haddara and H. Skanes, “A reflection on cooperative education: from experience to experiential learning,” *Asia-Pacific J. Coop. Educ.*, vol. 8, no. 1, pp. 67–76, 2007.
- [5] B. F. Blair, M. Millea, and J. Hammer, “The impact of cooperative education on academic performance and compensation of engineering majors,” *J. Eng. Educ.*, vol. 93, no. 4, pp. 333–338, 2004.
- [6] M. Weisz and S. Smith, “Critical changes for successful cooperative education,” *Proc. 28th HERDSA Annu. Conf.*, pp. 605–615, 2005.
- [7] M. Saribiyik, “Meslek yükseköğretiminde nitelikli işgücü yetiştirmek için 3+1 Eğitim

- modeli,” *Acad. Platf. J. Eng. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 39–41, 2013.
- [8] C. Erden Özsoy, “Mesleki eğitim - istihdam ilişkisi: Türkiye’de mesleki eğitimin kalite ve kantitesi üzerine düşünceler,” *Electron. J. Vocat. Coll.*, vol. 5, no. 5, pp. 173–181, 2015.
- [9] N. Köklü, “Tutumların ölçülmesi ve likert tipi ölçeklerde kullanılan seçenekler,” *Ankara Üniversitesi Eğitim Bilim. Fakültesi Derg.*, vol. 28, no. 2, pp. 81–93, 1995.
- [10] A. S. Albayrak, A. Eroğlu, Ş. Kalaycı, E. Küçükşille, B. Ak, M. Karaatlı, H. Keskin, E. Çiçek, A. Kayış, Ö. Antalyalı, N. Uçar, H. Demirgil, D. İşler, and O. Sungur, “*SPSS uygulamalı çok değişkenli istatistik teknikleri*”, 5th ed. Ankara: Asil Yayın Dağıtım, 2010.
- [11] K. Özdamar, “*Paket programlar ile istatistiksel veri analizi - Cilt 2*”. Nisan Kitapevi, 2013.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 06.10.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 20.02.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.342119	

Gömülü çelik boru sistemlerinin zaman tanım alanında yapısal analizi

Serkan Çoban¹, Seyit Çeribaşı*²

ÖZ

İnsanların temiz suya erişimini sağlayan içme suyu boru hattı sistemleri toplumun yaşam kalitesini arttıran çok kritik tesislerdir. Kentlerde nüfus artışı ve sanayileşmenin gelişimine paralel olarak temiz suya erişim çok daha önemli bir hale gelmiştir ve içme suyu boru hatlarındaki herhangi bir aksaklık toplumsal ve ekonomik hayatı olumsuz etkilemektedir. Bakım onarım çalışmaları, hat deplase çalışmaları ve diğer altyapı tesislerinin imalatı sırasında meydana gelen operasyonel hasarlar içme suyu tesislerinin işlevinin sürdürmemesine neden olur. Bu sistemlerde önemli hasarlar oluşturan bir başka etken ise doğal afetlerdir ve bunların en yıkıcısı depremlerdir. Depreme dayanıklı boru hattı imalatı veya deprem öncesinde boru hatlarının bakım, onarım ve güçlendirilmesinin yapılması için yapısal analizlerin yürütülmesi son derece önemlidir. Bu çalışma kapsamında içme suyu sistemlerinde sık karşılan zemine gömülü basınçlı çelik boru hattı, sonlu elemanlar yazılımı ANSYS Workbench V17.1 kullanılarak üç boyutlu olarak modellenmiş ve zaman tanım alanında sismik analizi yapılmıştır. Yapılan analizlerde derinlik ve boru çapı parametreleri değiştirilerek çelik boruda meydana gelen gerilme ve deplasman miktarları araştırılmıştır. Ayrıca, uzun süren bu tür parametrik analizlerin pratik olarak yürütülebilmesi için pratik bir yöntem geliştirilip uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gömülü boru, çelik, sismik kuvvetler, yapısal analiz

¹ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Deprem Mühendisliği, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, serkan.coban@yandex.com

² Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Deprem Mühendisliği, Maltepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, seyitceribasi@gmail.com

* Corresponding Author: seyitceribasi@gmail.com

Structural time-history analysis of buried steel pipeline systems

ABSTRACT

Potable water pipeline systems, by which the population provides clean water, are critical facilities that increase the living quality of the society. Parallel to the increasing number of inhabitants and to the development of industry any breakdown of those systems will affect economy and human life negatively. Operational damages resulting from maintenance works, pipe relocation works, and construction of other infrastructures cause failure in services of potable water facilities. Another factor that causes damage in these systems is natural disasters, and the most harmful of them is earthquakes. Utilization of structural analyses is very important for production of earthquake resistant pipelines, or for maintenance, reparation, and retrofitting of pipelines before earthquake. In the scope of this study buried, internally pressurized, steel pipelines, which are frequently encountered in potable water systems, are three dimensionally modelled and their time-history analyses are done by using finite elements software ANSYS Workbench V17.1. The stress and displacement quantities of steel pipes are investigated by changing the parameters depth and pipe diameter in the performed analyses. Additionally, a practical method is developed for performing this type of parametric long-lasting analyses.

Keywords: Buried pipe, steel, seismic forces, structural analysis

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçme suyu sistemlerinin kesintisiz olarak çalışmasını sağlamak çevresel felaketlerin yaşanmaması ve toplumun yaşam standardı ile ülke ekonomisinin bozulmaması açısından önemlidir. Duke ve Morgan [1] enerji (elektrik, gaz), su (içme suyu, kanalizasyon), ulaşım ve iletişim olarak candamarı (lifeline) sistemlerini sınıflandırmıştır. Gömülü boruların hasara uğrayarak işlevini sürdürmesini engelleyen yıkıcı doğal afetlerin en önemlisi depremlerdir. İçme suyu boru hatlarında meydana gelebilecek bir hasar şehrin sakinlerinin temiz suya erişimini engellediği gibi deprem sırasında ikincil bir felakete dönüşebilecek olan yangına müdahale edememe durumuna da neden olacaktır. 1995 yılında Japonya'da meydana gelen ve 6000 kişinin ölümüne neden olan Kobe depreminde 559 kişi deprem sırasındaki yıkımlardan kurtulmasına rağmen, deprem sonrasında meydana gelen yangınlar nedeniyle hayatını kaybetmiştir [2-4].

Boru hatları tasarlanırken farklı çevre koşulları ve iletilen akışkanın niteliği gözönünde bulundurularak uygun boru boyutları ve malzemesi seçilmelidir. Gömülü borular çeşitli özelliklerine göre farklı şekillerde kategorize

edilmektedir. Yapıldıkları malzemeye göre metalik borular (dökme demir, düktil demir, özel çelik vs.), metalik olmayan borular (Asbestli çimento boru, donatılı ve donatısız beton boru, plastik borular vs.); yükleme sırasında gösterdikleri performansa göre rijit ve esnek borular; boru bağlantı şekillerine göre rijit bağlantılı ve esnek bağlantılı borular olarak gruplandırılmaktadır. Deprem esnasında boru hatlarında meydana gelebilecek hasarlar boruyu çevreleyen zeminin dinamik davranışına bağlı olduğu kadar, boru malzeme özellikleri ve boru bağlantı şekli ile de ilgilidir. Kaynaklı borular gibi boru gövdesinin boru bağlantı noktalarına göre daha zayıf ve daha az rijit olduğu borulara sürekli borular denilmektedir. Sürekli borularda çekme gerilmesinden kaynaklanan hasarlar, boru duvarındaki zayıflıktan dolayı lokal burkulmalar ve sığ bir derinliğe sahip boru hatlarında görülen kiriş burkulması sık rastlanan boru hasar türleridir. Boru bağlantısının boru açıklığından daha zayıf olduğu borulara ise parçalı borular denilmektedir. Parçalı borularda boruların bağlantı noktasından ayrılması ve bağlantı noktalarında kırılmalar sık görülen hasar türleridir [3-8].

Boru hatlarındaki deprem kaynaklı hasarlar borunun etrafındaki zeminin hareketinden dolayı meydana gelmektedir. Bu hasarlar deprem esnasında ya da deprem sonrasında zeminde

meydana gelen yer hareketleri ile ilişkili olarak geçici yer deformasyonu ve kalıcı yer deformasyonu olarak iki kategoride ele alınır. Geçici yer deformasyonu deprem dalgalarının yayılımı ile meydana gelen yer hareketleridir. Kalıcı yer deformasyonu ise deprem anında ya da sonrasında oluşan geri dönüşü olmayan deformasyonlardır [2 – 4, 7 - 9].

Gömülü boruların deprem davranışı üzerine araştırmacılar tarafından çeşitli çalışmalar yapılırken, ülkeler bazında ise gömülü boru hatlarının depreme karşı dayanıklı şekilde tasarlanmaları ve imalatların yapılması üzerine çeşitli standartlar hazırlanmıştır. Türkiye’de 15.02.2007 tarihinde Altyapılar İçin Afet Yönetmeliği [10] adı altında içme suyu ve kanalizasyon şebeke ve arıtmalarının doğal afetlere dayanıklı olarak tasarımlarının ve imalatlarının yapılması için yeni bir yönetmelik çıkartılmıştır. Mevcut yönetmelik kapsamlı olmasına rağmen, yönetmelikte boru hasar türleri, sismik risklerin boruya ne şekilde etki edeceği ve bir sismik analiz yöntemi belirtilmemiştir. Yönetmelikte belirtilmeyen durumlarda, pratik mühendislik açısından, TS EN 1998-4 standart numarası ile yayımlanan Eurocode-8 [9] depreme dayanıklı yapıların tasarımı standardının silolar, tanklar ve boru hatlarını içeren 4. Bölümü dikkate alınmaktadır. TS EN 1998-4 basitleştirilmiş bir analiz metodu sunmaktadır [4].

Gömülü boruların deprem davranışı konusu 3 boyutlu yapı-zemin ilişkisi içerdiğinden ve boruyu çevreleyen zeminin özdeş olmayan doğrusal ya da doğrusal olmayan bir ortam olmasından dolayı karmaşıktır ve hassas bir dinamik analiz gerektirir.

Bu çalışma kapsamında deprem dalgalarına maruz kalan içme suyu sistemlerinde karşılaşılan basınçlı gömülü çelik boru hattı 3 boyutlu zemin-boru modeli şeklinde sonlu elemanlar programı Ansys Workbench V17.1 kullanılarak modellenmiş ve zaman tanım alanında sismik analizler yapılmıştır. Zaman tanım alanında hesaplama yöntemi, zamana bağlı yüklerin etkisi altında, yapıların tepkisini ölçmek için kullanılan bir metottur. Bu yöntem sayesinde yapıda meydana gelen deplasman, gerilme ve kuvvetlerin zaman bağlı değişimleri belirlenebilmektedir. Genel olarak dinamik tepki hesaplamalarında hem lineer hem de nonlineer hesap için direkt integrasyon metodu ile çok yaygın olarak kullanılan bir hesap metodudur. Zaman tanım alanında yapılan analizler için maksimum yer ivmesi 0.3 g olan 31.18 saniye süresince gerçekleşen El centro (1940) deprem

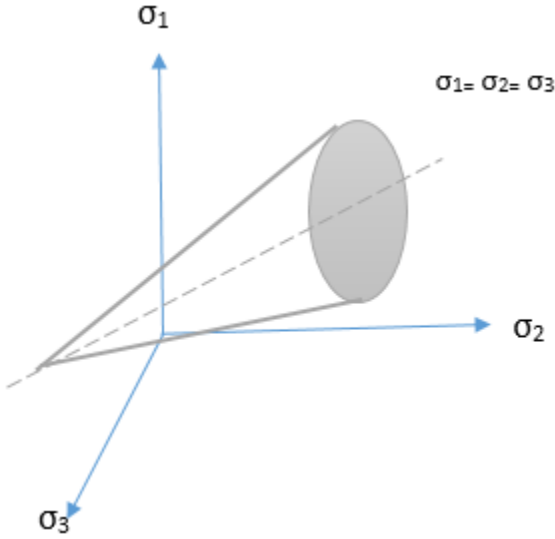
kaydı kullanılmıştır. Derinlik ve boru çapı parametreleri değiştirilerek çelik boruda meydana gelen gerilme ve deplasman miktarları araştırılmıştır. Ayrıca, uzun süren bu tür parametrik analizlerin pratik olarak yürütülebilmesi için pratik bir yöntem geliştirilip uygulanmıştır.

2. ÜÇ BOYUTLU BORU-ZEMİN SONLU ELEMAN MODELİNİN OLUŞTURULMASI (FORMATION OF THE THREE DIMENSIONAL PIPE-SOIL FINITE ELEMENT MODEL)

Mühendisliğin birçok alanında yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar metodu, sürekli sistemlerin probleme uygun şekilde sonlu elemanlara ayrılmasıyla çözüm sunan yaklaşık bir yöntemdir. Sonlu elemanlar programı olan Ansys Workbench v17.1 kullanılarak 3 boyutlu zemin boru modeli oluşturulmuştur. Bu çalışma zemin ve boru olarak iki farklı geometrik modelden ve eleman tipinden oluşmaktadır. Zemin modeli dikdörtgen prizma şeklinde solid eleman olarak modellenirken, boru modeli ise zemine gömülü bir şekilde dairesel bir kesite sahip shell eleman olarak modellenmiştir. Boru hatlarının gerçek davranışını modelleyip analizini yapmak çeşitli zorluklar içerdiğinden analizi kolaylaştırmak için bazı kabuller gerekmektedir. Çelik boru bağlantı noktaları dikkate alınmaksızın düz bir boru olarak modellenmiştir. Boru hattındaki sıcaklık değişimi ve korozyon etkisi gözardı edilmiştir. Boru ve Zemin birbirine sürekli bağlı olarak modellenmiştir [11-12].

3. MALZEME ÖZELLİKLERİ (MATERIAL PROPERTIES)

Üç boyutlu zemin ortamı toprak, kaya, beton gibi granüler yapıya sahip malzemelerde uygulanabilen elasto-plastik doğrusal olmayan Drucker-Prager malzeme modeli ile modellenmiştir. Drucker-Prager malzeme modeli, Von Mises akma kriterinin hidrostatik gerilme etkisini de dikkate alarak değiştirilmiş halidir. Asal gerilmeler uzayında Drucker-Prager yaklaşımının akma yüzeyi koni şeklindedir (Şekil 1).



Şekil 1. Asal gerilmeler uzayında Drucker-Prager akma yüzeyi (Drucker-Prager yield surface in the principle stresses space)

Modelde mekanik davranış parametreleri olarak zeminin elastik özellikleri olan elastite modülü, Poisson oranı ve yoğunluk değerleri tanımlanırken; plastik davranışı modellemek için ise kohezyon, sürtünme açısı ve dilatasyon açısı tanımlanmıştır. Kohezyon, sürtünme açısı ve dilatasyon açısı davranış modeli olarak kullanılan Drucker-Prager modelinin temel parametreleridir. Kohezyon akma dayanımı ile ilişkilidir ve sıfırdan büyük olmalıdır. Sürtünme açısı akma yüzeyinin eğimi ile ilişkili iken dilatasyon açısı ise akma potansiyeli ile ilgilidir [13-14]. Drucker-Prager ile elasto-plastik zemin ortamının fiziksel özelliklerini tanımlamak için ANSYS malzeme kütüphanesi yeterli değildir. Malzeme kütüphanesinde sadece zeminin elastik özellikleri tanımlanabilirken, plastik özelliklerinin atanması için APDL (ansys parametric design language) komutu girilmesi gereklidir.

Zemin için girilen malzeme komutu şu şekildedir:

```
/prep7
```

```
Et,1,solid95
```

```
Mp,ex,1,20000000
```

```
Mp,nuxy,1,0.25
```

```
mp,dens,1,1700
```

```
Tb,dp,1
```

```
Tbdata,1,60000,29,2
```

Boru modellemesi için içme suyu sistemlerinde sıklıkla kullanılan çelik boru tercih edilmiştir. Shell eleman olarak modellediğimiz boru; elastik-mükemmel-plastik, homojen ve izotropik olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Zemin ve boru

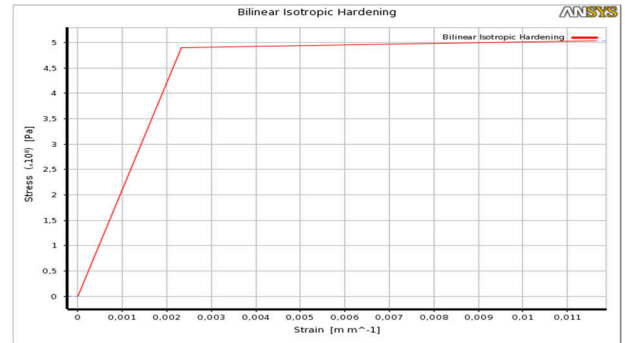
malzeme özellikleri sırasıyla Tablo 1 ve Tablo 2’de verilmiştir. Çelik boru malzemesinin gerilme-birim uzama (σ - ϵ) davranışı ise Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Zemin malzeme özellikleri (Soil material properties)

Mekanik Özellik	Parametre	Değer
Elastik Özellik	Yoğunluk (kg/m^3)	1700
	Young modülü (MPa)	20
	Poisson oranı	0.25
Plastik Özellik	Kohezyon (kPa)	60
	Sürtünme açısı	29

Tablo 2. Çelik boru malzeme özellikleri (Steel pipe material properties)

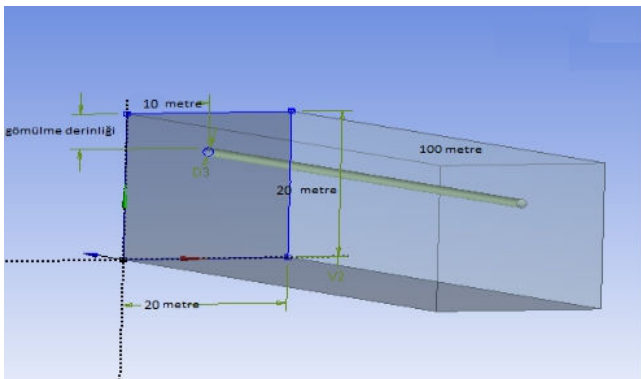
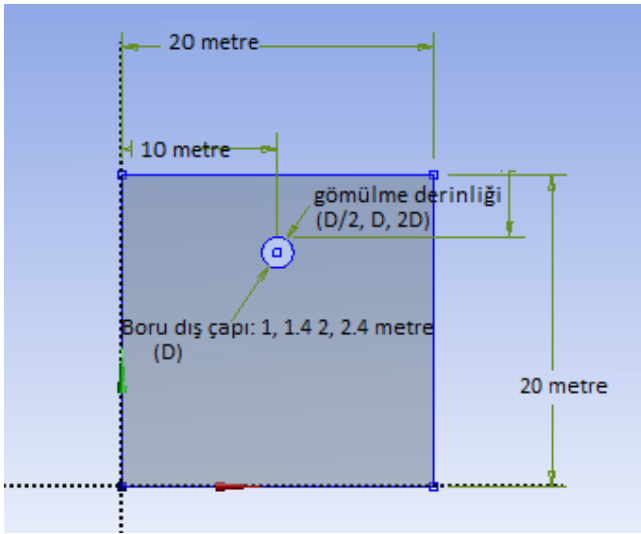
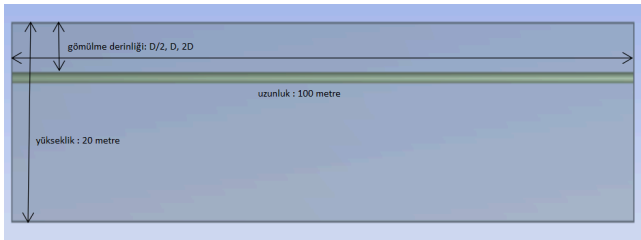
Mekanik Özellik	Parametre	Değer
Elastik Özellik	Yoğunluk (kg/m^3)	7850
	Young modülü (MPa)	210.7×103
	Poisson oranı	0.3
Plastik Özellik	Akma dayanımı (MPa)	490
	Kopma dayanımı (MPa)	690-840



Şekil 2. Çelik borunun gerilme-şekil değiştirme grafiği (Stress-strain graphic of the steel pipe)

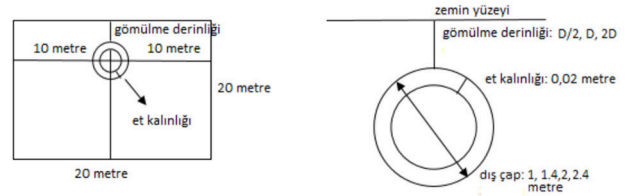
4. MODEL GEOMETRİSİ VE KULLANILAN ELEMAN TİPLERİ (THE MODEL GEOMETRY AND THE TYPES OF THE USED ELEMENTS)

Bu çalışma zemin ve boru olarak iki farklı geometrik modelden ve eleman tipinden oluşmaktadır. Zemin ortamı dikdörtgen prizma şeklinde solid eleman olarak modellenirken, çelik boru ise dairesel bir kesite sahip shell eleman olarak modellenmiştir. Zemin ortamı Şekil 3'te görüldüğü üzere 20 metre yüksekliğinde, 20 metre genişliğinde ve 100 metre uzunluğunda tek katmanlı olarak modellenmiştir. Zemin modellenirken her biri 3 serbestliğe sahip 20 düğüm noktalı 3 boyutlu solid 95 yapısal elemanı kullanılmıştır.



Şekil 3. Sonlu elemanlar modelinin geometrik ölçüleri (Geometrical dimensions of the finite elements model)

Boru elemanları 0.02 metre et kalınlığında; 1.0, 1.4, 2.0 ve 2.4 metre dış çaplarında (D) ve 100 metre uzunluğunda doğru eksenli shell 181 elemanı ile modellenmiştir. Shell 181 4 düğüm noktalı, her bir düğüm noktasında 6 serbestliğe sahip yapısal bir elemandır. Gömülü borular bu uzunluklarda tek parça olarak döşenmez. Kullanılan borunun malzeme özelliklerine ve kullanım amacına göre belirli uzunluklarda olan boru parçaları kaynaklı ya da kaynaklız olarak birleştirilerek boru hatları meydana gelir. Analizi kolaylaştırmak için borunun düz ve tek parça olduğu kabulü yapılmıştır. Borunun zemin içindeki konumu ise yatayda borunun merkez noktası zeminin orta noktasına gelecek şekilde belirlenmiş iken düşeyde zemin yüzeyinden boru tepe noktasına kadarki D/2, D ve 2D gibi farklı derinliklerde analizler yapılmıştır (Şekil 4).

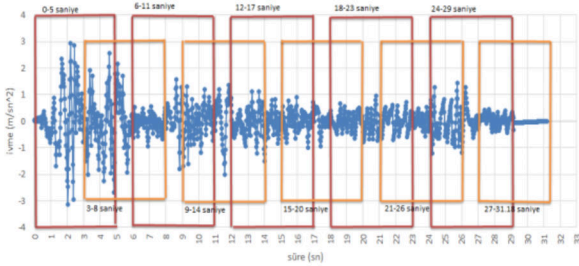


Şekil 4. Boru modelinin geometrik ölçüleri (Geometrical dimensions of the pipe model)

5. ÇÖZÜM ALGORİTMASI (SOLUTION ALGORITHM)

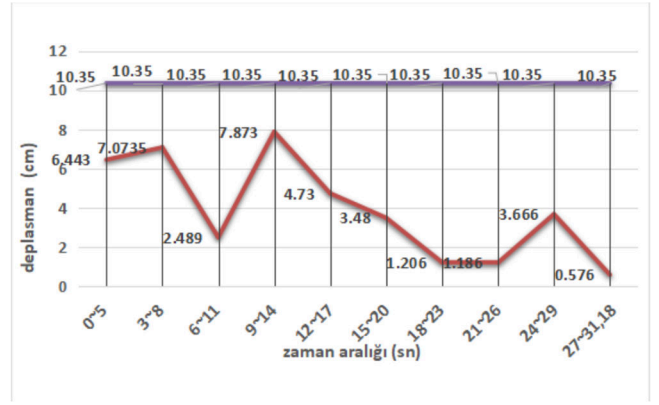
Gömülü borulara üzerindeki zeminin ağırlığı, trafik yükü, işletme basıncı, eğer boru yeraltı su seviyesinin altında ise su yükü gibi birçok farklı kuvvet etki etmektedir. Gömülme derinliği, hendek tipi, geri dolgu malzemesinin cinsi gibi etkenler boruya etkileyen kuvveti değiştirmektedir. Bu çalışmada modellenen zemin homojen kabul edilmiştir, yani her noktasında aynı özelliktedir. Aç kapa metodundaki gibi hendek içerisine geri dolgu ile yapılan boru döşeme yönteminde meydana gelen zeminin özelliklerinin değişimi bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Bir nevi kazısız teknolojik yöntemler ile yapılan boru döşeme işlemine yakın bir zemin ortamı modellenmiştir. Minimum boru iç basıncına sahip bir boru modelinin sonuçları gözlemlenmek istenildiğinden boru iç basıncı isale hatları için minimum sayılacak bir basınca yakın bir şekilde 250 kPa olarak kabul edilmiştir.

Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizlerde 0.3 g maksimum yer ivmesine sahip 31.18 saniyelik El Centro deprem kaydı (Şekil 5) kullanılmıştır. Deprem kaydının tüm süresini kullanmak parametrik analizlerde zaman kaybına neden olmaktadır ve çalışmanın devamlılığını zorlaştırmaktadır. Bu nedenden dolayı pencereleme yöntemini kullanarak uygun kısa zaman aralığının tespiti yapılmıştır. Şekil 5'teki El Centro deprem kaydı öncelikle 2 metre gömülme derinliğine sahip 2 metre çaplı boru hattı modeline tüm süre etkilmiştir. Daha sonra ise deprem kaydı beşer saniyelik bölümler halinde modele etki ettirilmiştir. Yükleri uygularken başlangıç koşulları önemli olabilmektedir. Bu yüzden bu beşer saniyelik kısımlar seçilirken ardışık bölümlerin birbirini kapsayacak şekilde olmasına dikkat edilmiştir ve bu yükler sisteme boru doğrultusuna dik olarak düşey doğrultuda etkilmiştir. Beşer saniyelik kısa kayıtların sisteme etkilmesi sonucu meydana gelen maksimum deplasman değerleri tüm sürenin etkilmesi ile meydana gelen deplasman değeri ile kıyaslanmış ve en yakın sonucu veren kısa aralığın analizlerde kullanılması uygun bulunmuştur.



Şekil 5. Pencerelemiş El Centro depremi ivme-zaman grafiği (Windowed acceleration-time graphic of El Centro earthquake)

Yapılan çalışmalar sonucunda Şekil 6'da yer alan grafik elde edilmiştir. Bu grafiğe göre tüm sürenin etkilmesi sonucunda borunun tepe noktasında 10.35 santimetre deplasman gözlemlenmiştir. Bu değere en yakın sonuç ise parametrik analizlerde kullanılacak olan 9. Saniye ile 14. Saniye aralığında meydana gelen 7.87 santimetre deplasman değeridir. Etkili kısa zaman aralığının tespiti ile tek bir analizin süresi 8 kat azaltılmıştır. Bu sayede birçok parametrenin değerlendirildiği analizlerde zamandan tasarruf sağlanmış ve analizlerin kontrolü daha kolay bir hale gelmiştir.

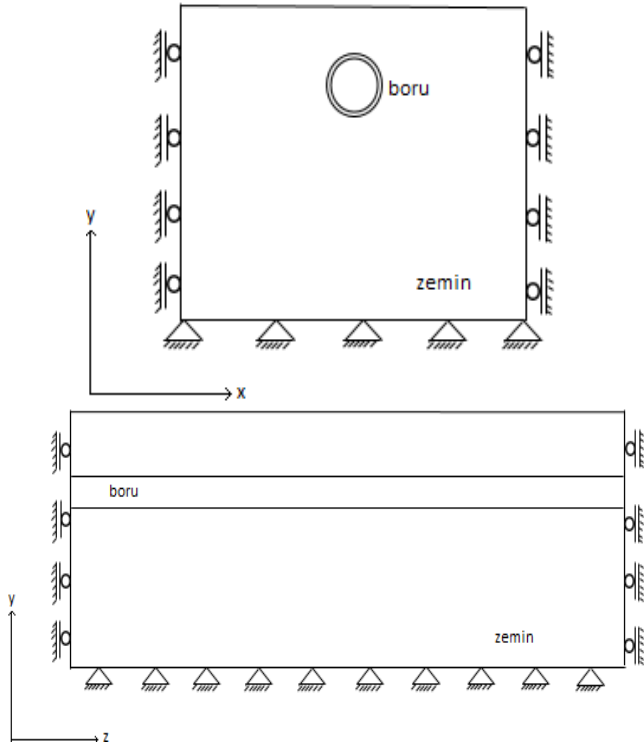


Şekil 6. Pencereleme yöntemi sonucunda meydana gelen deplasman sonuçları (Displacement results of the windowing method)

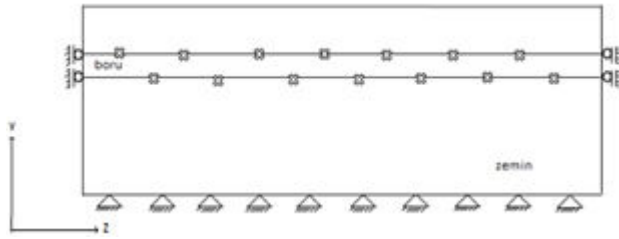
6. SINIR KOŞULLARI (BOUNDARY CONDITIONS)

Bu çalışmada yapılan analizlerde benzer sınır koşullarıyla modeller oluşturulmuştur. 3 boyutlu zemin modelinin alt kısmı hem yatay hem de düşey hareketi engelleyecek şekilde ($u_x=0, u_y=0, u_z=0$), 4 adet yan kısmı ise yataydaki hareketi engelleyecek ($u_x=0, u_z=0$) düşeyde hareket etmesine izin verecek (u_y serbest) şekilde sınır koşulları oluşturulmuştur (Şekil 7). Boru uç noktaları ise herhangi bir depo ya da bina gibi hareketini kısıtlayacak bir durum olmadığından yatayda hareketini kısıtlayacak düşeyde de serbest hareket edecek şekilde ($x=0, u_z=0, u_y$ serbest) sınır koşulları oluşturulmuştur (Şekil 8). Geoteknik problemlerine çözüm ararken zemin modellerinde çoğunlukla bu sınır şartı kullanılmaktadır. Lee [11] gömülü boru hatlarının deprem davranışını incelerken sonsuz uzunluktaki boru ve zemin ortamının sınır şartlarını bu şekilde oluşturmuştur. Analizlerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için zemin ortamını 10 m x 15 m x (15, 50, 100) m boyutlarında oluşturmuştur. Ayrıca bina bağlantısı gibi rijit bir bağlantı noktasını modellemek için ise boru uç noktasının hareketini 3 yönde de kısıtlamış ve iki farklı sınır şartının etkilerini kıyaslamıştır. Sahoo ve diğ. [15] 20 m x 20 m x 50 m ve Almatian ve diğ. [12] 10 m x 5 m x 30 m ölçülerindeki zemin boru modelleriyle bu çalışmaya benzer şekilde sonsuz uzunlukta gömülü boru sistemleri modellemişler ve benzer sınır şartlarını oluşturmuşlardır. Bu çalışmada ise benzer şekilde boru-zemin ortamı modellenmiş olup, 20 m x 20 m x 100 m ölçülerinde ve benzer çalışmalardan daha büyük bir zemin modeli oluşturularak dalga yansımalarının

olası olumsuz etkilerinden kurtulmaya çalışılmıştır.



Şekil 7. Zemin sınır koşulları (Soil boundary conditions)

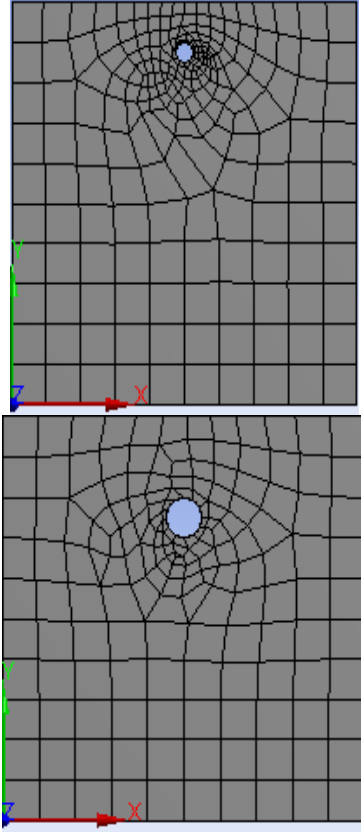


Şekil 8. Boru sınır koşulları (Pipe boundary conditions)

7. BÖLÜNTÜLEME BİLGİLERİ (MESHING INFORMATION)

Yapılan analizlerde Ansys Workbench V17.1 programının otomatik mesh seçeneği kullanılmıştır. Manuel bölüntüleme denemeleri yapılmakla beraber programın mesh algoritmasının daha başarılı olduğu anlaşılmıştır. Eleman boyutunun belirlenmesi aşamasında yine 2 metre gömülme derinliğine sahip 2 metre çaplı gömülü boru modeli ele alınmıştır. Program tarafından otomatik olarak belirlenen eleman boyutu maksimum 4.42 metre, minimum eleman boyutu ise 0.80 metredir. Ansys Workbench içerisinde yer alan “mesh metric” seçeneği ile oluşturulan mesh ağının kalitesini kontrol etme olanı sağlamaktadır. Mesh metric içerisinde yer

alan element quality, aspect ratio, jacobian ratio, warping factor, parallel deviation, maximum corner angle, skewness ve orthogonal quality seçenekleri ile kontroller yapılmıştır. Bu şekilde yapılan kontrollere örnek vermek gerekirse skewness ölçütü öncelikli bir kalite ölçüsüdür. 1 ile 0 arasında bir değer alan bu ölçütte, değer sıfıra yaklaştıkça mesh kalitesi mükemmelleşir. Otomatik olarak belirlenen eleman boyutları ile yapılan mesh işleminin ortalama skewness değerinin 0.74 olduğu görülmüştür. Eleman boyutlarının belirlenmesinde program içerisindeki seçeneklerin kullanılmasının yanı sıra farklı eleman boyutlarına sahip modeller analiz edilerek boruda meydana gelen maksimum gerilmeler karşılaştırılmıştır. Eleman boyutları küçültülerek farklı eleman boyutlarında yapılan analizler sonucunda ve program içerisinde kaliteli bir bölüntülemeyi kontrol etmek için sunulan mesh metric seçeneğinin de kullanılmasıyla maksimum eleman boyutunun 2 metre, minimum eleman boyutunun ise 0.20 metre seçilmesinin analizler için uygun olduğuna karar verilmiştir. Eleman boyutlarının daha fazla küçültülerek mesh yoğunluğunun artırılması sonucunda boruda meydana gelen gerilme değerinin anlamlı bir şekilde değişmediği görülmüştür. Bu boyutlar ile yapılan bölüntülemenin ortalama skewness değerinin 0.17 olduğu görülmüştür. ve bu değer 0'a çok yakın bir değerdir. 2D gömülme derinliğine sahip boru modellerinin bölüntülemesi Şekil 9'da verilmiştir ve yapılan bölüntüleme işleminden sonra tüm modellerde oluşturulan eleman ve düğüm sayıları da Tablo 3'de yer almaktadır.



Şekil 9. Boru çapı (D) 1 m ve 2 m olan 2 D gömülme derinliğindeki modellerin bölüntülenmesi (The meshing of the models with the pipe diameter (D) of 1 m and 2 m at the burying depth of 2D)

Tablo 3. Farklı derinlik ve boru çapına sahip modellerdeki eleman ve düğüm noktası sayısı (The number of elements and nodes for the models with various depth and pipe diameter)

Boru Çapı (m)	Derinlik (m)	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Sayısı
1	0.5	78876	21329
1	1	86020	22976
1	2	76984	20841
1.4	0.7	67333	17402
1.4	1.4	65243	16910
1.4	2.8	67883	17918
2	1	57034	14408
2	2	59972	15108
2	4	49568	12717
2.4	1.2	48183	12019
2.4	2.4	48287	12015
2.4	4.8	46892	11936

8. ANALİZLER VE DEĞERLENDİRMELER (ANALYSES AND ASSESSMENTS)

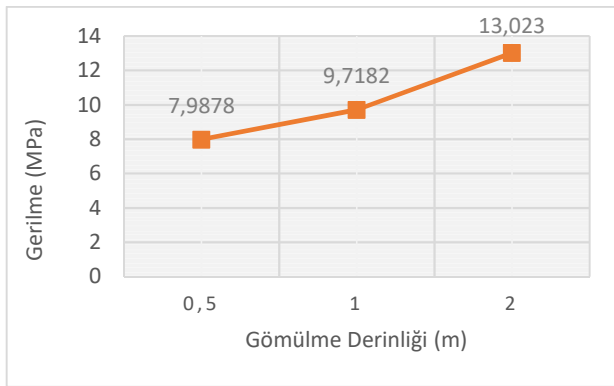
Bu çalışma kapsamında 20 m x 20 m x 100 m boyutlarında zemin ortamı ve içme suyu sistemlerinde kullanılan zemine gömülü basınçlı çelik boru hattı, sonlu eleman yazılım programı Ansys Workbench V17.1 kullanılarak, 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Deprem esnasında oluşan dalga yayılımının boru hatlarına etkileri zaman tanım alanında analiz yapılarak tespit edilmiş ve bu amaçla maksimum yer ivmesi yaklaşık olarak 0.3 g olan 31.18 saniye süreli El Centro deprem kaydı kullanılmıştır. Oluşturulan modele tüm sürenin etkilenmesi ciddi bir zaman almaktadır ve birden fazla analiz gerektiren parametrik çalışmalarda bu süreler kat be kat fazla olacağından analiz süresini kısaltmak çalışmayı kolay ve sürdürülebilir hale getirecektir. Bu sebeplerden ötürü bu makalede zemine gömülü boru hatlarına dalga yayılımı etkisini incelemek için zaman tanım alanında yapılacak olan analizlerin daha kısa sürelerde tamamlanmasını sağlayacak bir çalışma yapılmıştır. Uygun kısa aralığın tespiti ile ilgili yapılmış olan çalışmada, maksimum yer ivmesini kapsamayan bir aralığın kullanılmasının daha uygun olduğu görülmüş ve yapılan bu çalışmadaki tüm analizlerde bu kısa aralık kullanılmıştır. Bu çalışma sayesinde maksimum yer ivmesinin olduğu aralığın analizlerde yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır.

Öncelikle gömülü çelik boru hattının derinlik değişiminin dalga yayılımı ile ilişkisini anlamak amacıyla boru dışçapı (D) 1, 1.4, 2, 2.4 m olan boru hattı modelleri, boru gömülme derinlikleri D/2, D, 2D olacak şekilde oluşturulmuş ve analiz edilmiştir.

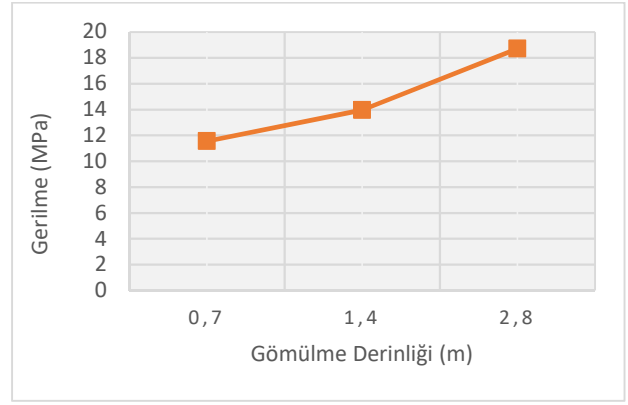
Tüm analizlerdeki gerilme sonuçları dikkate alındığında hepsinin benzer trend gösterdiği Şekil 10, 11, 12, 13'teki grafiklerde görülmektedir. Tüm analizlerde D/2'de minimum gerilme değeri meydana gelirken, 2D'de maksimum gerilme değeri meydana gelmiştir. Sahoo ve diğ. [15] 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile 2100 mm çaplı boru hattını modellemişlerdir. Yaptıkları çalışmada derinlik değişiminin çap ile ilişkisini ve birbirine paralel iki boru hattı arasındaki mesafenin değişiminin etkilerini araştırmışlardır. Yapılan analizler sonucunda bu çalışmalarda çıkan sonuçlardan farklı olarak, boru çapına eşit gömülme derinliğinde gerilmenin en fazla olduğu, D/2 ve 2D derinliklerinde daha az gerilme meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen

deplasman değerleri ele alındığında; 1 m, 1.4 m, 2 m ve 2.4 m çaplı boruların derinlik değişimine göre deplasman grafikleri Şekil 14-17'de sırasıyla verilmiştir. Sahoo ve diğ. [15]'nin yaptığı çalışmada deplasman ile ilgili sonuçlar gerilme grafiğine benzer bir şekildedir. Maksimum deplasman miktarı boru çapına eşit gömülme derinliğinde meydana gelirken, boru çapının yarısına eşit olan gömülme derinliğinde minimum değer meydana gelmiştir. Sahoo ve diğ. [15] tek bir çap üzerinden sonuçları irdelerken, bu çalışmada birden fazla boru çapı incelenmiştir. 1 ve 2 m boru çaplı modellerde oluşan deplasman değerlerinde (Şekil 14, Şekil 16) Sahoo ve diğ. [15]'nin yaptığı çalışma ile benzer bir sonuç elde edilmiştir. Şekil 17'de görüleceği üzere 2.4 m çaplı modelde ise yine boru çapına eşit olan gömülme derinliği diğerlerine göre büyük çıkmıştır. Boru çapı 1.4 m olan modelin deplasman sonuçları (Şekil 15) diğer sonuçlardan farklı çıkmıştır. Bu modelde en büyük deplasman değeri boru çapının yarısına eşit olan gömülme derinliğinde görülürken, en küçük deplasman değeri ise gömülme derinliği boru çapının iki katına eşit olan modelde meydana gelmiştir.

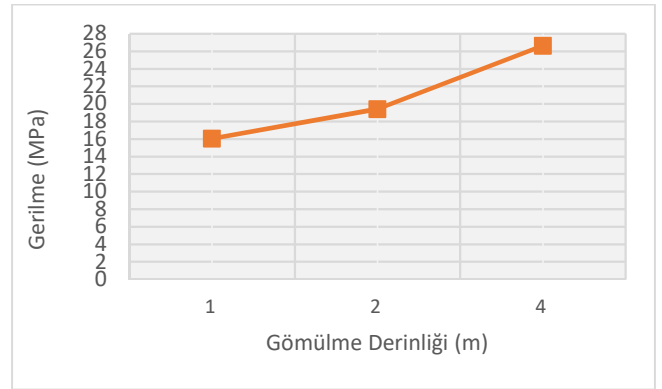
Son olarak da boru çapı değişiminin etkilerini incelemek amacı ile 2 metre gömülme derinliğine sahip 1, 1.4, 2, 2.4 çaplarındaki modeller analiz edilmiştir. Şekil 18'de gösterilen grafiğe göre analizler sonucunda boru çapı artışı ile gerilme doğru orantılı olarak değişmektedir. Deplasman değerleri (Şekil 19) için ise 2.4 metre çapa sahip modelde maksimum değer gözlemlenmiştir. 1.4 metre çapa sahip modelde ise deplasman değeri diğer modeller arasındaki en düşük değerdir.



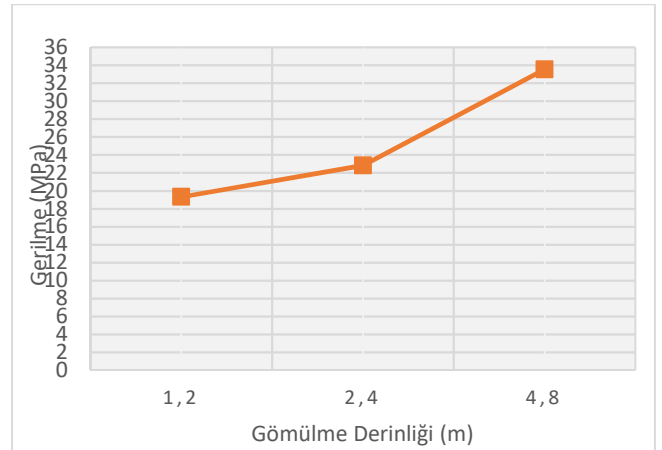
Şekil 10. 1 m boru çaplı modelin derinlik değişimine göre Von Mises gerilmesi (Von Mises stress with respect to the depth change for the model with 1 m diameter)



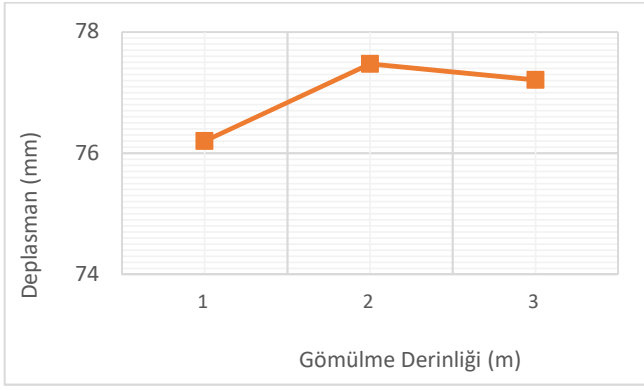
Şekil 11. 1.4 m boru çaplı modelin derinlik değişimine göre Von Mises gerilmesi (Von Mises stress with respect to the depth change for the model with 1.4 m diameter)



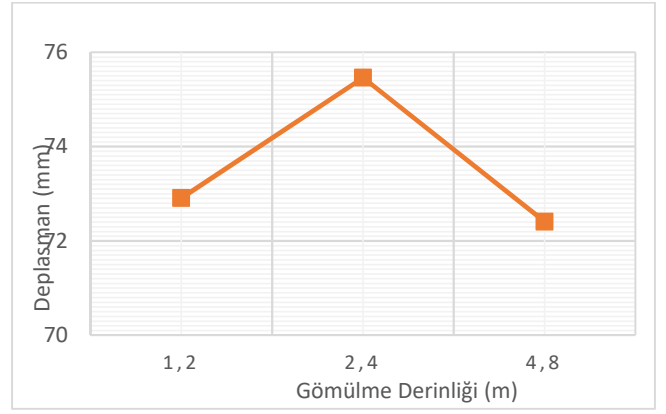
Şekil 12. 2 m boru çaplı modelin derinlik değişimine göre Von Mises gerilmesi (Von Mises stress with respect to the depth change for the model with 2 m diameter)



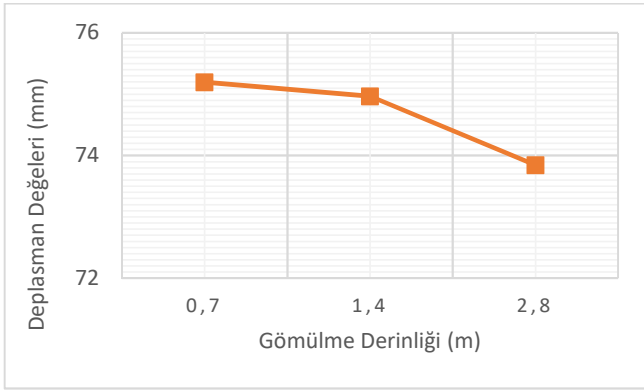
Şekil 13. 2.4 m boru çaplı modelin derinlik değişimine göre Von Mises gerilmesi (Von Mises stress with respect to the depth change for the model with 2.4 m diameter)



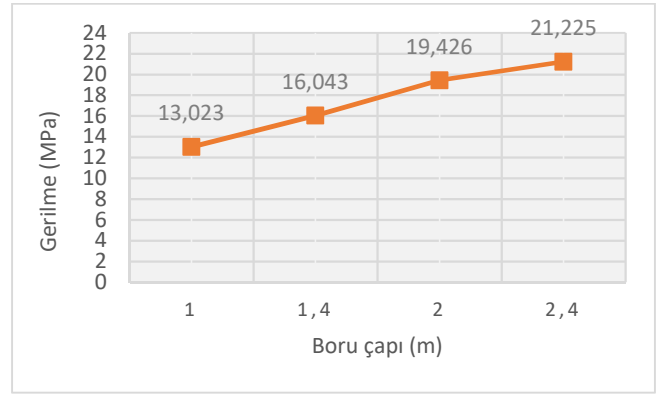
Şekil 14. 1 m boru çaplı modelin derinlik değişimine göre deplasmanı (The displacement with respect to depth for the model with 1 m diameter)



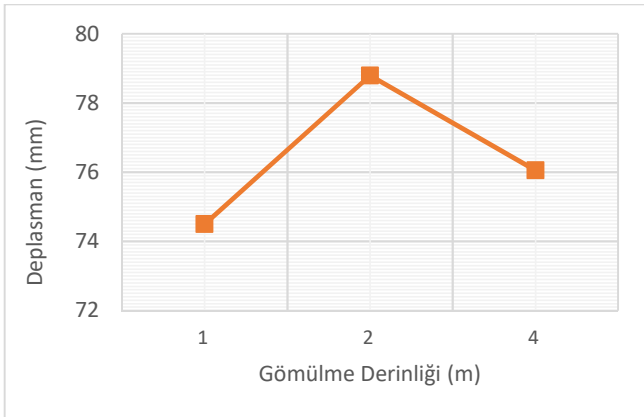
Şekil 17. 2.4 m boru çaplı modelin derinlik değişimine göre deplasmanı (The displacement with respect to depth for the model with 2.4 m diameter)



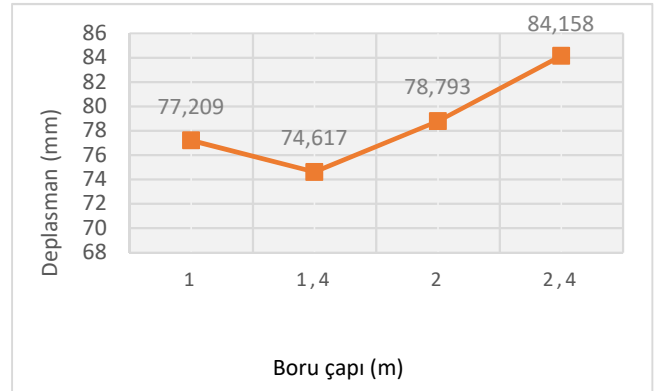
Şekil 15. 1.4 m boru çaplı modelin derinlik değişimine göre deplasmanı (The displacement with respect to depth for the model with 1.4 m diameter)



Şekil 18. Aynı gömülme derinliğindeki farklı çaplardaki borulardaki gerilme (The stresses of pipes with different diameters for the same embedding depth)



Şekil 16. 2 m boru çaplı modelin derinlik değişimine göre deplasmanı (The displacement with respect to depth for the model with 2 m diameter)



Şekil 19. Aynı gömülme derinliğindeki farklı çaplardaki borulardaki deplasman (The displacements of pipes with different diameters for the same depth)

9. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak gömülü boru hatlarının 3 boyutlu modellenmesi ve zaman tanım alanında sismik analizi anlatılmıştır. Ayrıca, gömülü boru hatlarını hasara uğratabilecek sismik risklerin değerlendirilmesinde kullanılabilir bir analiz yöntemi bu çalışmada sunulmuştur.

Zaman tanım alanında yapılan analizlerde maksimum yer ivmesi yaklaşık olarak 0.3 g olan El Centro deprem kaydının 31.18 saniyelik tüm süresinin kullanımı analiz süresini arttırmakta ve parametrik analizleri zorlaştırmaktadır. Bu amaçla uygun bir kısa aralığın tespitinin yapılması için bir çalışma yapılmıştır. Maksimum yer ivmesini içeren aralığın analizler için en uygun aralık olmayabileceği anlaşılmıştır.

Boru çapı 1, 1.4, 2, 2.4 metre olan modeller oluşturularak gömülme derinliğinin - boru çapı ikilisinin gerilme ve deplasman ile ilişkisi araştırılmıştır. D boru çapına sahip bir çelik borunun D/2, D, 2D gömülme derinliklerine yerleştirilerek yapılan analizlerde meydana gelen gerilme ve deplasman değerleri Şekil 10-17'deki grafiklerde gösterilmiştir. Gerilme değerlerinin verildiği grafikler incelendiğinde gömülme derinliğinin artması ile gerilme değerinin arttığı görülmektedir. Deplasman grafikleri incelendiğinde ise 1, 2, 2.4 metre boru çapına sahip modellerin D gömülme derinliğinde maksimum değere ulaştığı tespit edilmiştir. 1.4 metre boru çaplı modelin deplasman grafiği ise diğer grafiklerden farklı olmuştur. Bu nedenle boru çapı ve gömülme derinliği arasındaki ilişkiyi anlamak için farklı zemin koşulları ve boru tipleri de dikkate alınarak daha fazla analiz yapılması gereklidir. Meydana gelen deplasman değeri boru bağlantı noktasının zayıf olduğu parçalı borularda önemlidir.

Son olarak, boru çapı değişiminin deplasman ve gerilme değerleri üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla 1, 1.4, 2, 2.4 metre çaplı boru hattı 2 metre gömülme derinliğine yerleştirilerek analizler yapılmıştır. Şekil 18'de yer alan gerilme grafiğinde boru çapı arttıkça gerilme değerinin arttığı görülmektedir. Şekil 19'daki deplasman grafiğinde ise 1.4 metre çaplı boru hattı modeli dışındaki modellerde boru çapı arttıkça meydana gelen deplasman miktarının da arttığı görülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Duke CM, Moran DF. "Guidelines for Evolution of Lifeline Earthquake Engineering". In *Proceedings of US National Conference on Earthquake Engineering*, 367-376, Oakland: Earthquake Eng Res Inst.1975.
- [2] American Lifelines Alliance. "Seismic Guidelines for Water Pipelines". *American Lifelines Alliance*, Oakland, USA, 2005.
- [3] Flores-Berrones R, Li Liu X. "Seismic Vulnerability of Buried Pipelines". *Geofisica Internacional*, 42(2), 237-246, 2003.
- [4] Çoban S, Çeribaşı S. "İçme suyu ve kanalizasyon borularının sonlu elemanlar metodu ile 3 boyutlu sismik analizi". *Proceeding of 1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*, Adana, Türkiye, 26-28 October 2016.
- [5] Karamanos SA, Keil B, Card RJ. "Seismic Design of Buried Steel Water Pipelines". *Pipelines 2014: from Underground to the Forefront of Innovation and Sustainability: Proceedings of the Pipelines 2014 Conference*, Portland, Oregon, USA, August 3-6 2014.
- [6] Suresh RD, Sudhir KJ. "Seismic Design of Buried Pipelines in India Context". In *Proceedings of the Conference of the National Information Center of Earthquake Engineering*, Bangalore, India, 2005.
- [7] O'Rourke MJ, Lui X. "Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects". In *Response of Buried Pipelines Subject to Earthquake Effects*, New York, USA, US Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (MCEER), 1999.
- [8] Dash SR, Jain S K. "IITK-GSDMA Guidelines for Seismic Design of Buried Pipelines: Provisions with Commentary and Explanatory Examples". Kanpur, India, National Information Center of Earthquake Engineering, 2007.
- [9] Türk Standartları Enstitüsü. "Eurocode 8: Depreme dayanıklı yapıların tasarımı-Bölüm 4: Silolar, tanklar ve boru hatları". *TS EN 1988-4*, Türkiye, 2006.

- [10] Resmî Gazete. “Altyapılar İçin Afet Yönetmeliği, Türkiye, 2007.
- [11] Lee H. Finite Element Analysis of a Buried Pipeline. Master Thesis, The University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, Manchester, UK, 2010.
- [12] Alamatian E, Ghadamkheir M, Karimpou B.”Stress Estimation on Pipeline and Effect of Burying Depth”. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 6(2), 228-235. 2013.
- [13] Ansys Inc. “ANSYS Mechanical APDL Material Reference”.2013.
- [14]http://ansys.net/ansys/tips_sheldon/STI0802_Drucker_Prager.pdf (05.04.2017)
- [15] Sahoo S, Manna B, Sharma KG. “Seismic Behaviour of Buried Pipelines: 3D Finite Element Approach”. *Journal of Earthquakes*, vol. 2014, Article ID 818923, 2014.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 01.11.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 10.11.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.348477	

Inconel 718 süper alaşımın plazma ark kaynak yöntemi ile birleştirilmesinde akım şiddetinin etkisi

Nida Katı*, Mustafa Bölükbaşı, Sermin Ozan

ÖZ

Bu çalışmada Havacılık ve Nükleer enerji sektöründe sıklıkla kullanılmakta olan Nikel bazlı Inconel 718 süper alaşımı plazma Kaynağı ile birleştirilmiştir ve birleştirme işleminde 130-140-160-180 ve 200 A olmak üzere beş farklı akım kullanılarak akım şiddetinin kaynaklı birleştirme üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan kaynak işleminde ilerleme hızı 0,1 m/dk ve gaz debisi ise 0,5 lt/dk. Olarak sabit tutulmuş olup, kaynak işlemi numunelerin sadece tek yüzeyine uygulanmıştır. Kaynak işlemi sonrasında numunelere çekme testi uygulanmış ve mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda numunelerin birleşme noktalarında akım şiddetinin artması ile birlikte nüfuziyetin ve çekme mukavemetinin arttığı sertlik değerlerinin ise akım şiddetinden etkilenmediği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: süper alaşım, inconel 718, plazma kaynağı.

The Effect of current intensity on joining the Inconel 718 super alloy with the plasma arc welding method

ABSTRACT

In this study, Nickel-based Inconel 718 super alloy, which is frequently used in aerospace and nuclear energy, is combined with Plasma Welding Method. The effect of current density was investigated by using five different currents 130-140-160-180 and 200A in the coupling process. The speed of progress of the welding process is 0,1 m / min and gas flow is 0,5 lt / min. and the welding process is applied to only one surface of the sample. Tensile tests were applied to the samples and microhardness measurements were made after welding. As a result of the study, it was observed that the penetration with increasing current intensity at the junction points of the samples and the hardness values with increasing tensile strength were not affected by the current intensity.

Keywords: süper alloys, inconel 718, plazma welding,

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Süper alaşım ailesinin demir-nikel bazlı grubunda bulunan Inconel 718, çökeltme sertleşmesi sayesinde yüksek mukavemet değerlerine sahip olabilmekte ve dayanımını 650°C'ye kadar koruyabilmektedir. Dolayısıyla Inconel 718; uçak motorları, nükleer tesisler gibi yüksek sıcaklık dayanımı ve mukavemeti istenen uygulamalarda aranan malzeme grubu haline gelmiştir [1]. PTA kaynak yöntemi: Metallerin bir tungsten elektrod ve bir iş parçası arasında oluşturulan bir ark ile iletilen ısı sayesinde gazla korunan ark kaynağı işlemi olarak tanımlanabilir. Ark bakır alaşımli nozul deliği tarafından bir ark sütunu oluşturmak için yüksek oranda sıkıştırılır. Plazma, plazma gazının bir kısmının iyonlaştırılması yoluyla oluşur [2]. PTA kaynak yöntemi, üretim kaynağı olarak uzay endüstrisi, havacılık ve nükleer endüstrilerde çok yaygın kullanıma girmiştir. Özellikle dikiş kalitesi, güvenilirliği ve ekonomiklik açısından kabul edilen bir yöntemdir. GTA kaynak yöntemi ile kaynak edilebilen tüm metal ve alaşımları PTA kaynak yöntemi ile de güvenilir bir biçimde kaynak edilirler [3]. PTA kaynak yöntemi diğer ergitme kaynak yöntemleriyle karşılaştırıldığında yüksek sıcaklık, yüksek enerji girdisi, düşük termal girdi ve düşük üretim maliyeti gibi avantajlara sahiptir [4]. Choi, J.-P. Vd.; Inconel 718 süper alaşımını lazer ergitme yöntemi ile birleştirmişler, lazer tarama hızını çalışma parametresi olarak seçmişlerdir. Ergitme havuzunda hızlı soğuma nedeniyle sütun şekilli taneler gözlemlemiş ve istenilen özellikte mikroyapı ve yoğunlaşma bulgularını elde etmişlerdir [5]. Damodaram, R. Vd.; Inconel 718 süper alaşımını sürütme kaynağı ile birleştirmişler, kaynak öncesi ve kaynak sonrası yaptıkları ısıl işlemlerin sonucunda, kaynak sonrası yapılan ısıl işlemin daha yüksek mukavemet ve sertlik meydana getirdiği sonucuna ulaşmışlardır [6]. Ramkumar, K.D. vd Inconel 718 süper alaşımı ile AISI 316 paslanmaz çeliğini sürekli akım ve darbeli akım GTA kaynak yöntemleri ile birleştirmişler ve nikel alaşım kaplı dolgu teli olan ERNiCu-7 kullanmışlardır. Çalışma sonucunda dolgu telinin kaynak bölgesinde zararlı fazlar ortaya çıkarmadığını tespit etmiş, yapılan çekme deneylerinde kopmanın AISI 316 malzemesinde olduğunu gözlemlemiş ve sürekli akım kullanılan birleştirmelerde daha iyi metalurjik ve mekanik özellik elde etmişlerdir[7]. Mei, Y.vd.; Inconel

718 süper alaşımını EB kaynak yöntemi ile birleştirmişlerdir. Çalışma sonunda kaynak havuzu ve ITAB'daki mikroyapıda tane büyümesi meydana geldiğini ve ITAB da çatlak olasılığının ana metalin tane boyutuna ve kaynak hızına bağlı olduğunu belirtmişlerdir[8]. Ramkumar, K.D vd.; Inconel 718 süper alaşımını GTA kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve kaynak sırasında TiO₂ ve SiO₂ dolgu malzemesi kullanmışlardır. TiO₂ takviyeli kaynakların SiO₂ takviyeli kaynaklara göre daha yüksek çekme mukavemeti gösterdiğini belirlemişlerdir [9]. You, X. Vd.; Inconel 718 süper alaşımını elektron ışını ile ergiterek, ısıl işleminin çözültideki etkisini araştırmışlardır. Çözeltiye alma işleminin elektron ışını ile ergitilen Inconel 718 süper alaşımının mukavemetinin artışında çok ciddi rol oynadığını gözlemlemişlerdir [10]. Chen, J. vd; yaptıkları çalışmada Ti-6Al-4V süper alaşımını PTA ve GTA kaynak yöntemleri ile birleştirmişler, çalışma sonucunda PTA kaynak işleminde ısı girdisi kontrolünü daha kolay sağladıklarını ve PTA kaynak işlemi ile birleştirilen numunelerde daha iyi mekanik özellikler ortaya çıktığını tespit etmişlerdir [11]. Chun-Ming Lin vd. ; yaptıkları çalışmada ASM 6431 çeliğini PTA kaynak yöntemi ile birleştirmişler ve numunelere temperleme ısıl işlemi uygulamışlardır. Isıl işlemin kaynak bölgesinde sertlik ve gerilme mukavemetini azalttığını gözlemlemişlerdir [12]. Dikbaş, H.; yaptığı çalışmada Ti6Al4V süper alaşımını PTA kaynak yöntemi ile birleştirmiştir. Çalışma sonucunda yorulma dayanımının kaynak gücü ile doğru, ilerleme hızı ile ters olarak değiştiğini, ilerleme hızının artması ve ısı girdisinin azalması sonucunda sertlik değerlerinin düştüğünü tespit etmiştir[13].

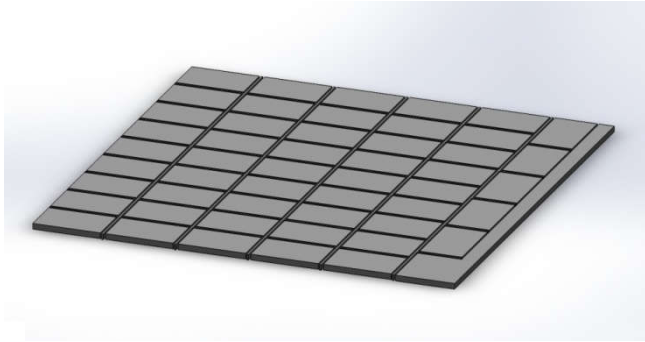
2. MATERYAL VE METOD (GENERAL REQUIREMENTS)

Çalışmada piyasadan 500x500x6 mm ölçülerinde plaka olarak temin edilen Inconel 718 süper alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşıma ait kimyasal analiz Tablo 1'de gösterilmiştir.-

Tablo 1. Inconel 718 malzemesine ait spektral analiz

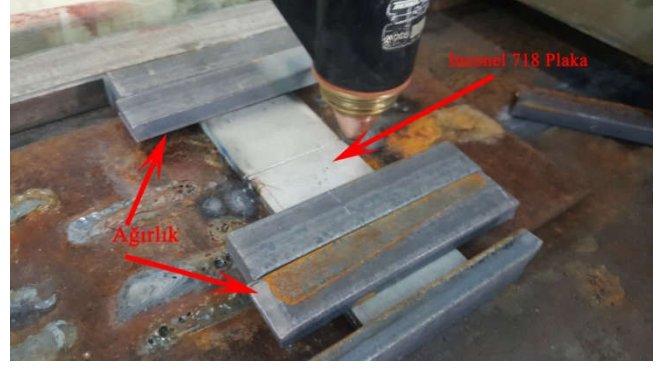
Ni	52,2	W	0,01
Cr	19,1	Si	0,05
Fe	17,8	V	0,05
Nb	4,6	Cu	0,03
Mo	3,4	C	0,04
Ti	1,34	S	0,01
Al	0,34	P	0,01
Co	0,27	Pb	0,01
Mn	0,23		

Inconel718 plaka, kaynak işlemi için Şekil 1’de şematik olarak gösterildiği üzere 80x50x6 mm ebatlarında lazer kesim tezgâhındakesilmiştir.



Şekil 1.Lazer ile kesilen Inconel 718 plakasının şematik görseli

Lazer ile 80x50x6 mm boyutlarında kesilen plakalar kaynak işlemi öncesi fırçalanarak yüzeyleri temizlenmiştir. Daha sonra plakalar PTA kaynak tezgâhınaŞekil 2’de de görüldüğü gibi kaynak torcunun ilerlediği yöne paralel olarak yerleştirilmiştir. Yerleştirilenmalzemelerin kaynak işlemi esnasında hareket etmesini engellemek için ağırlıklar yerleştirilmiştir.



Şekil 2.PTA kaynak işlemi öncesi plakaların plazma kaynak makinesi tablasına yerleştirilmesi

PTA kaynak yöntemi ile kaynak işlemine başlanmadan önce, kaynak parametrelerini belirlemek için bazı deneme birleştirmeleri gerçekleştirilmiş, elde edilen sonuçlara göre numunelerin birleştirilme parametreleri belirlenmiştir. Kaynak işlemlerinde akım değişken olarak belirlenmiş olup PTA torcu 0,1 m/dk sabit hızda ilerlemiştir. Plazma ve koruyucu gaz olarak Argon gazı kullanılmış ve gazların debisi 0,5 lt/dk olarak belirlenmiştir. Numunelere ait kaynak parametreleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kaynak parametreleri

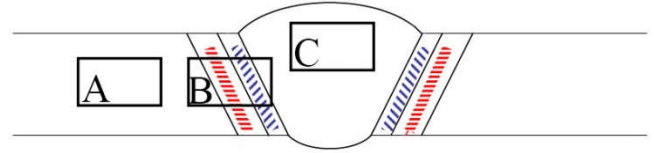
Numune Numarası	Akım (A)	Gaz Debisi (lt/dk)
N1	130	0,5
N2	140	0,5
N3	160	0,5
N4	180	0,5
N5	200	0,5

Kaynak işlemi dolgu teli kullanılmadan gerçekleştirilmiştir. Kaynaklanan numunelere kaynak işlemi veya sonrası herhangi bir ısıl işlem uygulanmamış, kaynak sonrası numuneler havada soğumaya bırakılmıştır. PTA kaynak yöntemi ile birleştirilen numuneler çekme ve metalografik testler için tel erezyon ile kesilmiştir. Kesim sonrası kaynaklı numunelerin resimleri, Şekil 3’de gösterilmiştir.

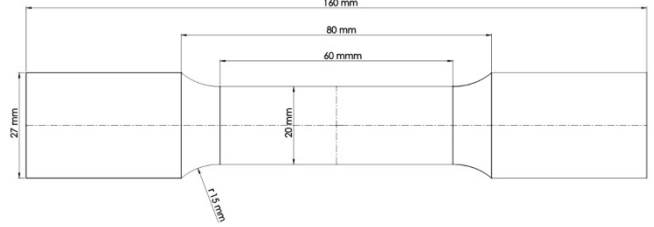


Şekil 3. Kaynaklı numunelerin tel erezyon kesimi sonrası

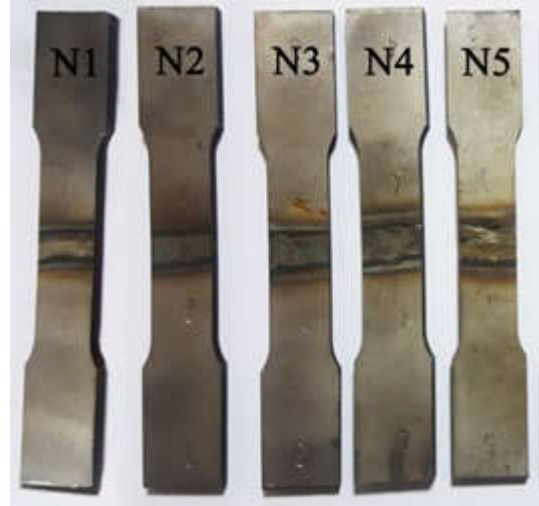
PTA kaynak işlemi sonrası tel erezyon ile kesilmiş olan 30x15x6 mm ölçülerine sahip olan numuneler bakalite alma işlemi sonrası metalografik inceleme için zımparalanmış ve ardından 3µm' lik elmas pasta ile parlatılarak dağlama işlemine hazır hale getirilmişlerdir. Dağlama işlemine hazır olan numuneler; 2 ml Nitrik Asit (HNO₃), 2 ml Hidroklorik Asit (HCl), 1 ml Hidroflorik Asit (HF) içeriğine sahip çözelti içerisinde 20 saniye bekletilerek dağlanmışlardır. Dağlama işleminin ardından numunelerin yapısında meydana gelen metalografik değişimleri inceleme amacı ile optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak görüntüleri çekilmiştir. Optik mikroskop görüntüleri Şekil 4'de görülmekte olan şablona göre çekilmiştir. Şablonda bulunan A, B ve C noktaları sırası ile; ısıdan etkilenmeyen bölgede kalan ana malzeme bölgesi, ısının tesiri altında kalan bölge, kaynak havuzu bölgesidir. Daha sonra XRD analizleri yapılmıştır. Numunelerin kaynak ara yüzeyinde meydana gelmiş olan sertlik değişimlerini incelemek amacı ile sertlik analizleri yapılmıştır. Mikrosertlik analizleri yapılırken 3 farklı noktadan ölçümler alınmıştır. Bu noktalar; kaynak bölgesi, ince taneli bölge ve kaba taneli bölgedir. Sertlik analizleri 1 kg yük uygulanarak 10 saniye yükleme ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sırasında kare tabanlı, 136°'lik piramit uç kullanılmıştır. Numuneler, çekme mukavemetlerinin belirlenmesi amacı ile çekme testine tabi tutulmuşlardır. Çekme deneyi numuneleri DIN 50125 Standartlarına göre Şekil 5'de gösterilmiş olan ölçülerde tel erezyon kesim işlemi sonrası elde edilmiştir. Hazırlanan numunelerin çekme deneyleri 3 mm/dk çekme hızında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da çekme deneyi için hazır bulunan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4. Optik görüntü şablonu



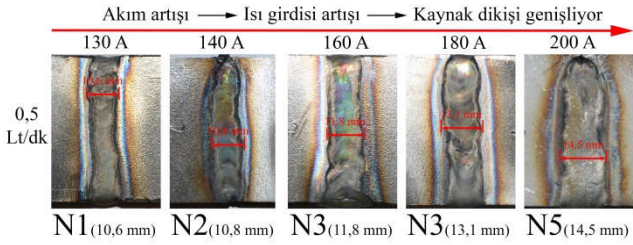
Şekil 5. DIN 50125 standartlarına göre hazırlanmış çekme numunesi boyutları



Şekil 6. Çekme numuneleri

3. BULGULAR VE İRDELEME (RESULTS AND DISCUSSION)

Numunelerin kaynak sonrası makro fotoğrafları incelendiğinde, akım şiddetinin artması ile artan ısı girdisinin sonucu olarak kaynak dikişlerinde genişleme gözlemlenmiştir. Kaynak dikişi kıyaslaması için yapılan ölçümler kaynak başlangıç ve bitiş noktalarına minimum 10 mm uzak olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de tüm numunelere ait kaynak dikişi kalınlıklarının yer aldığı karşılaştırma görüntüsü gösterilmiştir.



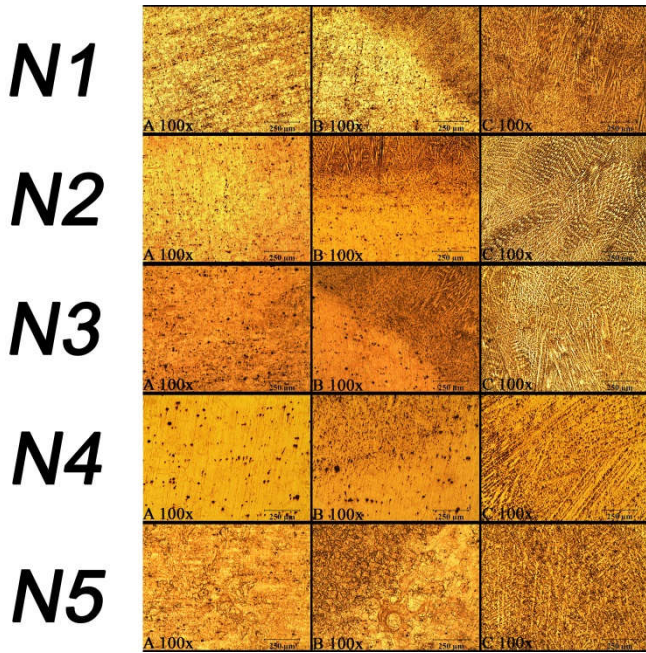
Şekil 7. Kaynak dikişi karşılaştırma görüntüsü

Numunelere mikroyapı incelemesi öncesi XRD analizi yapılmıştır. Tablo 3'de XRD analizi sonrası tespit edilen bazı fazlar verilmiştir.

Tablo 3. XRD analizleri

N1	N2	N3	N4	N5
Fe ₃ Ni ₂	Fe ₃ Ni ₂	Fe ₃ Ni ₂	Fe ₃ Ni ₂	Fe ₃ Ni ₂
Fe ₂ Ni	Fe ₂ Ni	Fe ₂ Ni	FFe ₂ Ni	Fe ₂ Ni
Co ₃ Ti	Co ₃ Ti	Co ₃ Ti	Co ₃ Ti	Co ₃ Ti
			Ni ₄ Mo	Ni ₄ Mo
Ni ₃ Nb	Ni ₃ Nb	Ni ₃ Nb	Ni ₃ Nb	Ni ₃ Nb

Inconel 718 süper alaşımının kaynaklı birleştirilmesi sonucunda numunelere uygulanan XRD analizleri sonucunda bütün numunelerde literatürde, laves fazı olarak adlandırılan Fe₂Ni fazı, literatürde γ' ve δ olarak adlandırılan Ni₃Nb fazı ve γ' olarak adlandırılan temel mukavemet arttırıcı Co₃Ti fazı tespit edilmiştir.



Şekil 8. Numunelere ait optik mikroskop görüntüleri

Şekilde 8'de N1, N2, N3, N4 ve N5 numunelerine ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde tüm numunelerde kaynak bölgesinde ergime sonrası katılaştıran metalin eşeksenli dentritik yapıda olduğu görülmektedir. Dentritlerin kısmen ergimiş bölgeden kaynak merkezine doğru yöneldiği

gözlemlenmiştir. ITAB'ın kaynak bölgesi dışında, ince taneli ve kaba taneli olmak üzere iki bölge içerdiği görülmektedir. Ergime bölgesinin hemen yanındaki ince taneli bölge ergime olmadan yüksek ısının etkisi ile rekristalizasyona uğramış olduğu, ince taneli bölgenin hemen dışındaki kaba taneli bölgede ısının etki ile tane irileşmesi meydana geldiği gözlemlenmiştir. Mikroyapıda siyah nokta benzeri yapılar ve iğnemi yapılar tespit edilmiş olup, siyah γ' (Ni₃Nb) fazı olduğu, tane sınırlarında bulunan iğne benzeri yapıların δ (Ni₃Nb) fazı olduğu düşünülmektedir. Kaynak işlemi sonrası ergiyen metalin katılaşması döküm işlemi sonrasında metalin katılaşması ile benzerlik gösterir. Ancak ergiyük boyunca geniş sıcaklık eğilimi ve kaynak işleminin doğası gibi bazı temel farklılıklar vardır. Bu farklılıklar katılaşma davranışının kaynak hızına bağlı olduğu anlamına gelir. Kaynak işleminde malzeme hızlı bir ısı işlem döngüsüne maruz bırakılır. Bu durum malzemenin mikroyapısında çeşitli farklılıklar meydana getirmektedir. Kaynak işlemi sonrası oluşan bu mikroyapılar kaynak bölgesindeki yorulma, mukavemet, tokluk gibi mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir [14]. Kaynağın ergime bölgesine doğrudan bitişik olan bölgede ergime olmadan şiddetli bir termal döngüye uğramış ana metal bulunur. ITAB'ın mikroyapısı ve özellikleri istenmeyen şekilde değişir. ITAB, birkaç alt bölgeye ayrılabilir ve bu bölgelerin sayısı ve tipi kaynaklanan malzemeye bağlıdır. Her bir alt bölge farklı bir mikroyapıya karşılık gelir. Mikroyapıda meydana gelen genel değişiklikler rekristalizasyon ve tane büyümesidir. Inconel 718 süper alaşımının kaynaklarında ITAB iki bölgeden oluşur. Bunlardan biri kaba taneli, diğeri ince taneli bölge olarak adlandırılabilir. [14].

Tablo 4. Numunelerin kaynak işlemi sonrası mikrosertlik sonuçları (HV)

Numune Numarası	Kaynak Bölgesi	İnce Taneli Bölge	Kaba Taneli Bölge
N1	238	234	275
N2	282	258	264
N3	262	260	256
N4	254	257	258
N5	273	268	267

Tablo 4 incelendiğinde en düşük sertlik değeri N1 numunesinin kaynak bölgesinden elde edilmiştir. Kaynak işlemi sonrası elde edilen mikrosertlik değerleri çoğunlukla kaynaklı numunenin sertlik değerine (245 Hv) yakın veya yüksektir. Sertlik değerleri incelendiğinde herhangi bir düzene rastlanmamıştır. Bu durumun metal laves ve γ' fazlarının yapı içerisinde düzensiz olarak dağılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 9.Çekme deneyi sonrası numuneler

PTA kaynak yöntemi ile birleştirilen Inconel 718 süper alaşımının hangi parametrelerde birleştirildiği ve birleştirme sonrasında uygulanan çekme deneyi sonrası numuneler Şekil 9'da gösterilmiştir. Tablo 5'de numunelerin kaynak parametreleri ile birlikte çekme deneyi sonuçları verilmiştir.

Tablo 5. Çekme deneyi uygulanan numunelere ait çekme mukavemeti ve % uzama miktarları.

Numune Numarası	Akım (A)	Çekme Mukavemeti (MPa)	%Uzama
N1	130	213,9	12
N2	140	217,8	10
N3	160	229,8	6,4
N4	180	239,6	8
N5	200	405,8	11,9

Tablo 5 incelendiğinde en yüksek çekme mukavemeti değeri (405,8 MPa) N5 numunesinde

elde edilmiştir. Bunun sebebi diğer numunelere göre N5 numunesinde daha yüksek nüfuziyet oranı sağlanmış olmasıdır. Numuneler çekme deneyi sonrasında incelenmiş ve tüm numunelerin kaynak metalinden koptuğu gözlemlenmiştir. Tablo 5 incelendiğinde N1'den N5'e doğru akım artışı ile birlikte çekme mukavemetinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebinin ısı girdisi artışına bağlı olarak A3B tipi YMK kafes yapısına sahip temel mukavemet artırıcı fazlardan olan γ' fazı (Co_3Ti)'nin miktarının artması ve literatürde laves fazı olarak adlandırılan AB2 tipi YMK kafes yapısına sahip Inconel 718 süper alaşımının içerisinde mukavemet düşürücü Fe_2Ni fazının azalması sonucu gerçekleştiği düşünülmektedir.

4. SONUÇLAR(CONCLUSION)



Bu çalışmada PTA kaynağı ile 5 farklı akım şiddeti ile Inconel 718 süper alaşımı birleştirilmiştir. Birleştirme işlemi sonrası numunelere mikroyapı analizi, sertlik analizi ve çekme deneyi uygulanmıştır. Tüm numunelerde kaynaklı bağlantının mikro sertliğinin ana malzemenin mikro sertliliğine yakın ya da daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Sertlik değerleri incelendiğinde herhangi bir düzene rastlanmamıştır. Bu durum metal laves ve γ' fazlarının yapı içerisinde düzensiz olarak dağılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. İnce taneli bölgenin hemen yanındaki kaba taneli bölgede sertlik değeri ana malzemenin sertlik değerinden yüksek, ince taneli bölgenin sertlik değerinden düşüktür. Bunun nedeni; ısının etkisi ile yeniden kristalleşmesi ve tane yapısının incelmesidir. Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde en yüksek çekme mukavemeti değeri (405,8MPa) N5 numunesinde elde edilmiştir. Bunun sebebi diğer numunelere göre N5 numunesinde daha yüksek nüfuziyet oranı sağlanmış olmasıdır. Numuneler çekme deneyi sonrasında incelenmiş ve tüm numunelerin kaynak metalinden koptuğu gözlemlenmiştir. Numunelerden akım artışına paralel olarak çekme mukavemetinde artma gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından Tef.16.01 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] H. Dinç, “Inconel 718 süperalaşımının termokimyasal borlanması,” *Yüksek Lisans Tezi*, 2013.
- [2] ASM Handbook Vol. 6(A), “Welding fundamentals and processes,” 2011.
- [3] M. Kılıç, “Aısı 304 paslanmaz çeliği ve 1040 çelik çifti'nin plazma kaynak yöntemiyle birleştirilebilirliğinin araştırılması,” *Yüksek Lisans Tezi*, 2008.
- [4] T. Gürgeç and C. Özel, “PTA yöntemi kullanılarak fecrc , feb ve few alaşımlarıyla kaplanan aısı 1020 çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması,” *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilim. Derg.*, vol. 28, no. 2, pp. 221–232, 2016.
- [5] J.-P. Choi *et al.*, “Densification and microstructural investigation of Inconel 718 parts fabricated by selective laser melting,” *Powder Technol.*, vol. 310, pp. 60–66, 2017.
- [6] R. Damodaram, S. R. . Ganesh, and K. R. Prasad, “Effect of post-weld heat treatments on microstructure and mechanical properties of friction welded alloy 718 joints,” *Mater. Des.*, vol. 53, pp. 954–961, 2014.
- [7] K. D. Ramkumar *et al.*, “Influence of filler metals and welding techniques on the structure-property relationships of Inconel 718 and AISI 316L dissimilar weldments,” *Mater. Des.*, vol. 62, pp. 175–188, 2014.
- [8] Y. Mei *et al.*, “Effect of base metal and welding speed on fusion zone microstructure and HAZ hot-cracking of electron-beam welded Inconel 718,” *Mater. Des.*, vol. 89, pp. 964–977, 2016.
- [9] K. D. Ramkumar *et al.*, “Studies on the weldability, microstructure and mechanical properties of activated flux TIG weldments of Inconel 718,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 639, pp. 234–244, 2015.
- [10] X. You *et al.*, “Effect of solution heat treatment on the precipitation behavior and strengthening mechanisms of electron beam smelted Inconel 718 superalloy,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 689, pp. 257–268, 2017.
- [11] J. Chen and C. Pan, “Welding of Ti-6Al-4V alloy using dynamically controlled plasma arc welding process,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 21, pp. 1506–1512, 2011.
- [12] C. M. Lin and C. H. Lu, “Effects of tempering temperature on microstructural evolution and mechanical properties of high-strength low-alloy D6AC plasma arc welds,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 676, pp. 28–37, 2016.
- [13] H. Dikbaş, “Ti6AL4V/Ti6AL4V malzeme çiftinin pta kaynağında kaynak bölgesinin incelenmesi,” *Doktora Tezi*, 2012.
- [14] D. W. J. Tanner, “Welded Inconel 718 At High Temperature,” *PhD thesis*, 2009.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 08.09.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 12.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.337199	

SPA-H atmosferik korozyona dayanıklı çelik saçların direnç nokta kaynaklı bağlantılarında hasar tipinin çekme-sıyırma dayanımı üzerindeki etkisi

Nuri Akkaş*¹

ÖZ

Bu çalışmada SPA-H atmosferik korozyona dayanıklı çelik saçların elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesinde oluşan hasar tiplerinin çekme-sıyırma dayanımına etkisi incelenmiştir. Atmosferik korozyona dayanıklı çelikler raylı sistem araçlarının gövdesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Numuneler 120 kVA gücünde elektrik direnç nokta kaynak makinesinde elde edilmiştir. Deneylerde kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi değiştirilirken elektrot kuvveti, sıkıştırma ve tutma süreleri sabit bırakılmıştır. Hazırlanan kaynaklı numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için numuneler çekme-sıyırma testlerine tabi tutulmuştur. Bağlantıların hasar tipleri ile çekme-sıyırma dayanımı arasındaki ilişki araştırılmış ve sonuç olarak kaynak akım şiddeti ve süresinin en uygun değerleri tespit edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: elektrik direnç nokta kaynağı, SPA-H çeliği, hasar tipi, çekme-sıyırma dayanımı

Failure mode effect on tensile-peel strength of resistance spot welds of SPA-H weathering steel sheets

ABSTRACT

In this study, influence of failure mode on tensile-peel strength of resistance spot welds of SPA-H weathering steel sheets was investigated. The weathering steels are widely used in the body of rolling stock. The samples were obtained in a 120 kVA capacity electrical resistance spot welding machine. The sheets were welded by RSW by fixing holding time, clamping time and electrode force as well as changing welding current and welding time. The prepared welding specimens were exposed to tensile-peel tests in order to determine the joint strengths. The relation between failure mode and tensile-peel strengths of obtained spot welded joints was researched, so the optimum welding currents and times were advised.

Keywords: resistance spot welding, SPA-H steel, failure mode, tensile-peel strength

* Corresponding Author

¹ Sakarya University, nuriakkas@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz endüstrisinde yaygın kullanılan kaynak yöntemlerinden biri olan elektrik direnç nokta kaynağı, iş parçalarından geçen elektrik akımına karşı iş parçalarının gösterdiği dirençten sağlanan ısı ve aynı zamanda basıncın tatbikiyle yapılan bir kaynak usulüdür. Isı, kaynak edilecek kısımlarda meydana gelir ve basınç kaynak makinasındaki elektrotlar vasıtasıyla uygulanır. [1,2].

Elektrik direnç nokta kaynağının avantajları arasında dolgu metali gerektirmemesi, yüksek üretim hızı, otomasyona uygunluğu, ark kaynağına nazaran operatör hatalarının daha az olması ve tekrar edilebilirliğinin iyi olması sayılabilir. Dezavantajları ise ekipman maliyetinin ark kaynağına nazaran yüksek olması ve bağlantı tipinin bindirme ile sınırlı olmasıdır [3].

Elektrik direnç nokta kaynağı yaygın olarak düşük karbonlu çeliklerin birleştirilmesinde kullanılır [4]. Yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, nikel, alüminyum, titanyum ve bakır alaşımları da bu yöntemle kaynak edilebilir [5].

Atmosferik korozyona dayanıklı çelikler, karbon miktarı % 0,2'den az olan ve bakır, krom, nikel, fosfor, silisyum ve mangan gibi alaşım elementlerinin toplam miktarı % 3-5'den fazla olmayan çeliklerdir [6,7]. Atmosferik korozyona dayanıklı çelik saclarda korozyon dayanımı, çeliğin bileşimine yaklaşık olarak %0,35 oranında bakır ilave edilmesiyle elde edilir [8].

SPA-H atmosferik korozyona dayanıklı çelikler demiryolu araçlarında, çelik kulelerde ve diğer yapılarda kullanılmaktadır.

Diğer kaynak yöntemlerinde olduğu gibi elektrik direnç nokta kaynağında da giriş parametreleri bağlantının kalitesini direkt olarak etkilemektedir. Kabul edilebilir dayanıma sahip bir bağlantı elde edebilmek için kaynak akım şiddeti, kaynak süresi ve elektrot kuvvetinin uygun değerlerinin kullanılması gereklidir [9]. Bu nedenle, bağlantının dayanımı ile proses parametreleri arasındaki ilişkiyi bulmak son derece önemlidir. Bununla birlikte, çekme-sıyırma testi bağlantının dayanımını tespit etmede önemli bir kriterdir [10].

Kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi üretilen ısı girdisi değerini direkt olarak etkiler. Bu parametrelerin artırılması, kaynak bölgesine giren ısı girdisi değerinin artmasına ve dolayısıyla

kaynak çekirdeğinin boyutunun ve bağlantının dayanımının da artmasına neden olur. Bununla birlikte aşırı akım şiddeti ve süresi fişkırtma, gözenek ve çatlak oluşumu, bağlantının dayanımının düşmesi, kötü bir yüzey görünümü ve elektrotların deformasyonu gibi istenmeyen durumlara neden olur [11,12].

Bu çalışmanın amacı kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi ile çekme-sıyırma dayanımları ve buna bağlı olarak ortaya çıkan hasar tipleri arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Bu sayede kaynak akım şiddeti ve kaynak süresinin en uygun değerleri tespit edilebilecektir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada, deney malzemesi olarak kullanılan SPA-H atmosferik korozyona dayanıklı çelik sac, elektrik direnç nokta kaynağı ile birleştirilmek suretiyle nokta kaynak bağlantılı numuneler elde edilmiştir. Deneylerde kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi değiştirilirken elektrot kuvveti, sıkıştırma ve tutma süreleri sabit bırakılmıştır. Elde edilen bağlantıların mekanik özelliklerini belirlemek için numuneler çekme-sıyırma testine tabi tutulmuştur.

2.1. Malzeme (Material)

Deney malzemesi olarak Türkiye Vagon Sanayi A.Ş.'de (TÜVASAŞ) üretilen raylı sistem araçlarının dam ve yan duvarlarında kullanılan 2.3 mm kalınlığında ki SPA-H atmosferik korozyona dayanıklı çelik saclar kullanılmıştır.

SPA-H çelik sacların kimyasal bileşimleri ve mekanik özellikleri sırasıyla Tablo 1'de ve Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Deney malzemelerinin kimyasal bileşimi (%)
(Chemical composition of steel sheets used in experiments (wt%))

Malzeme	C	Si	Mn	Al	Cu	Cr	Ni
SPA-H	0.081	0.419	0.426	0.031	0.315	0.664	0.328

Tablo 2. Deney malzemelerinin mekanik özellikleri
(Mechanical properties of the sheet steel)

Malzeme	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
SPA-H	457	572.7	40

2.2. Direnç Nokta Kaynak Prosesi (Resistance Spot Welding Process)

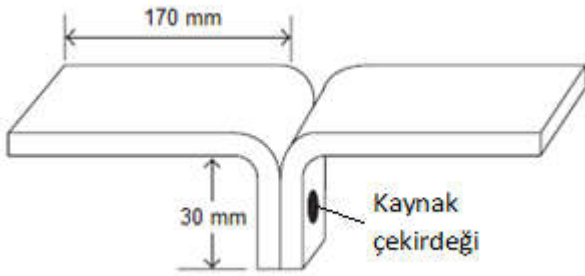
Deney parçaları, giyotin makas ile (200x30) mm boyutlarında kesildikten sonra, derin bir kap içerisinde %96 saflıktaki etil alkol içerisinde yıkanmış ve temiz bir bezle silinerek yüzeyleri yağ, pas ve kir gibi yabancı maddelerden arındırılmış ve üst üste bindirilerek kaynak edilmiştir.

Elektrot kuvveti tüm deney boyunca 4 kN değerinde sabit tutulmuş ve sürekli olarak kontrol edilmiştir. Kaynak süresi 10, 15, 20, 25 ve 30 periyot (1 periyot= 0.02 s) olarak değiştirilmiştir. Sıkıştırma ve tutma süreleri 25 periyot olarak sabit tutulmuştur. Kaynak akım şiddeti 6 kA'den 11 kA'ye kadar 0,5 kA artırılarak değiştirilmiştir.

2.3. Çekme-Sıyırma Testleri (Tensile-peel tests)

Kaynak akım şiddeti ve kaynak süresinin farklı değerleri kullanılarak elde edilen nokta kaynaklı bağlantıların çekme-sıyırma testleri EN ISO 14270'e [13] göre yapılmıştır.

Çekme-sıyırma deney numunelerinin boyutları şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Çekme-sıyırma deney numunesi (The tensile-peel specimens)

Çekme-sıyırma deneyleri sırasında çekme hızı 10 mm/dk olarak belirlenmiştir. Çekme-sıyırma dayanımı olarak verilen değerler, çekme makinesinin kontrol ünitesindeki kuvvet – zaman grafiğinden okunan maksimum değerlerdir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

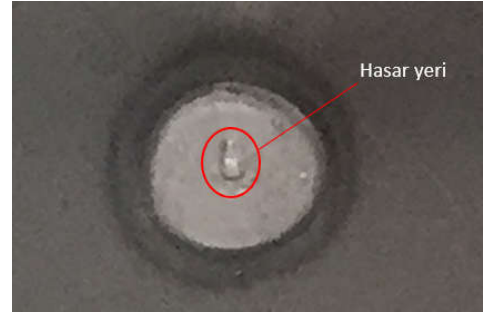
3.1. Hasar Tipi (Failure Mode)

Hasar tipi, nokta kaynaklı bağlantıların performansı için yaygın olarak kullanılan önemli bir kriterdir. Çekme-sıyırma deneylerinde şekil 2,

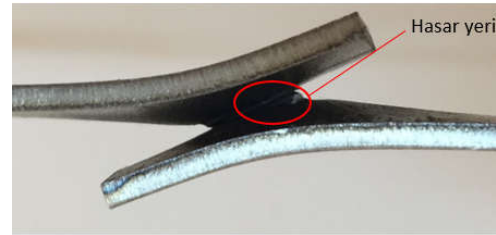
3 ve 4'te gösterildiği gibi üç farklı hasar tipi meydana gelmiştir:

- Ayrılma
- Düğmelenme
- Yırtılma

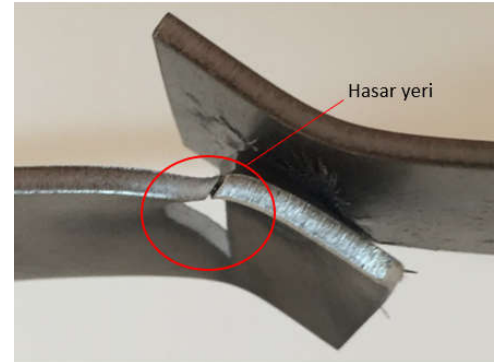
Ayrılma tipi hasar, birleşme bölgesi boyunca çatlak yayılımı yoluyla oluşur. Düğmelenme ve yırtılma tipi hasar ise kaynak çekirdeğinin birleştirilecek parçaların birinden çıkması ile ortaya çıkar.



Şekil 2. Çekme-sıyırma testlerinde oluşan ayrılma tipi hasar (Interfacial failure samples observed in tensile-peel tests)



Şekil 3. Çekme-sıyırma testlerinde oluşan düğmelenme tipi hasar (Partial pullout failure samples observed in tensile-peel tests)



Şekil 4. Çekme-sıyırma testlerinde oluşan yırtılma tipi hasar (Pullout failure samples observed in tensile-peel tests)

3.2. Kaynak Parametrelerinin Çekme-Sıyırma Dayanımına ve Hasar Tipine Etkisi (Effect of Welding Parameters on the Tensile-peel Load and the Failure Mode)

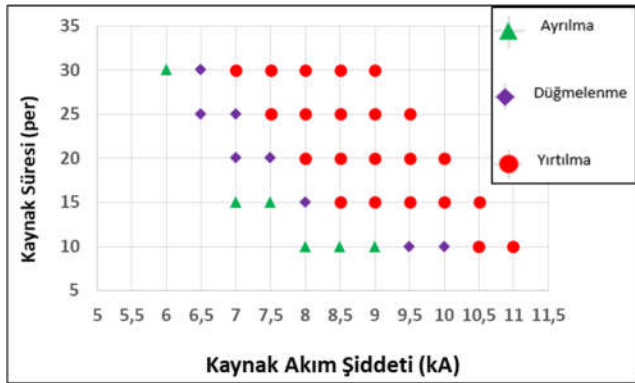
Düşük kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi kullanılarak yapılan nokta kaynağında kaynak bölgesine giren ısı girdisi değeri düşük olduğu için çekirdek boyutları da nispeten küçüktür. Buna

bağlı olarak çekme-sıyırma dayanımı da düşüktür. Bu yüzden çekme-sıyırma testlerinde ayrılma tipi hasar (şekil 2) oluştuğu gözlemlenmiştir.

Kaynak akım şiddeti ve kaynak süresinin artmasıyla birlikte çekirdek boyutları da büyümekte ve buna bağlı olarak bağlantıların çekme-sıyırma dayanımı da artmaktadır. Bu yüzden çekme-sıyırma testlerinde düğmelenme (şekil 3) ve yırtılma tipi hasar (şekil 4) oluştuğu gözlemlenmiştir.

Kaynak akım şiddeti ve süresinin çok yüksek olduğu durumlarda ise ısı girdisi değerinin oldukça artması nedeniyle malzeme ara kesitinde ki erime miktarı artmaktadır. Bununla birlikte elektrotların dalma derinlikleri artmakta ve kaynak çekirdeğinden fışkırmalar ortaya çıkmaktadır. Buna bağlı olarak kaynak çekirdek kesiti ve çekme-sıyırma dayanımları azalmaktadır. Bu yüzden bu bağlantılarda ayrılma tipi hasar (şekil 2) ve düğmelenme tipi hasar (şekil 3) oluşmaktadır [14-18].

Kaynak akım şiddeti ve kaynak süresinin hasar tipi üzerindeki etkisi şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Kaynak parametrelerinin hasar tipi üzerindeki etkisi (Effect of welding variables on the failure mode)

Şekil 6'da da görüldüğü gibi kaynak akım şiddeti ve süresinin farklı değerleri kullanılarak elde edilen bağlantıların çekme-sıyırma testlerinde ortaya çıkan hasar tiplerini incelediğimizde; akım şiddeti ve süresinin düşük değerlerinde ayrılma tipi hasar oluşmaktadır. Söz konusu değerler artırıldıkça bağlantılarda düğmelenme tipi hasarın oluşmaya başladığı gözlemlenmektedir. Akım şiddeti ve süresinin daha yüksek değerlerinde ise yırtılma tipi hasar ortaya çıkmaktadır.

3.3. Çekme-sıyırma Dayanımı ile Hasar Tipi Arasındaki İlişki (The Relation between Failure Mode and Tensile-peel Mode)

Elde edilen bağlantıların çekme-sıyırma dayanımlarını incelediğimizde maksimum dayanımın 7.5 kA akım şiddetinde ve 25 periyot kaynak süresinde meydana geldiğini gözlemleriz. Tablo 3'de her bir kaynak periyodu için maksimum dayanımın elde edildiği akım şiddeti gösterilmektedir.

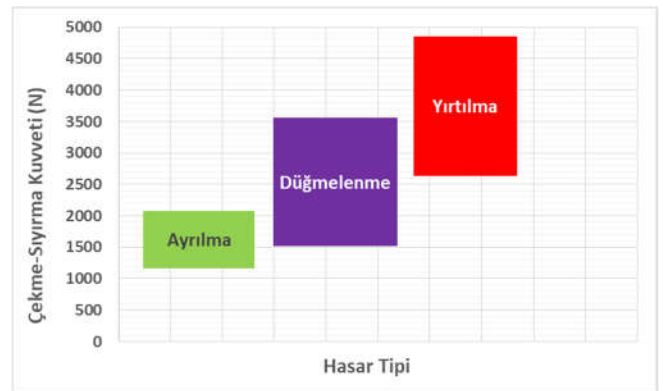
Tablo 3. Max. çekme-sıyırma dayanım değerleri (Max. tensile-peel load values.)

Kaynak Süresi (per)	Kaynak Akım Şiddeti (kA)	Max. Çekme-Sıyırma Dayanımı (N)	Hasar Tipi
10	10,5	3723	Yırtılma
15	9,5	3903	Yırtılma
20	8	4078	Yırtılma
25	7,5	4868	Yırtılma
30	7,5	3514	Yırtılma

Tablo 3'de de görüldüğü gibi en yüksek dayanım değerlerinin elde edildiği bağlantılarda yırtılma tipi hasar oluşmuştur.

Bununla birlikte ayrılma tipi hasarın oluştuğu numunelerde çekme-sıyırma dayanımının nispeten düşük olduğu görülmektedir. Düğmelenme ve yırtılma tipi hasarın oluştuğu numunelerde ise çekme-sıyırma dayanımları daha yüksektir.

Hasar tipi ile nokta kaynaklı bağlantıların çekme-sıyırma dayanımları arasındaki ilişki şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Çekme-sıyırma dayanımı-Hasar tipi (Tensile-peel load versus failure mode)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Raylı sistem araçlarında kullanılan SPA-H atmosferik korozyona dayanıklı çelik saçların

direnç nokta kaynağı deneylerinde; kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi değiştirilirken elektrot kuvveti, sıkıştırma ve tutma süreleri sabit bırakılmıştır. Ön deneylerde kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi değiştirilerek, kaynak işleminin gerçekleştiği en küçük değerden malzemelerin delindiği en büyük değere kadar kaynak yapılmıştır. Ön deneylerin sonuçlarına göre her deney koşulunda direnç nokta kaynak bağlantılı parçalar elde edilmiştir. Elde edilen bu bağlantıların laboratuvar koşullarında çekme-sıyırma testleri yapılmıştır. Elde edilen nokta kaynaklı bağlantıların hasar tipleri ile çekme-sıyırma dayanımı arasındaki ilişki incelenmiş ve sonuç olarak kaynak akım şiddeti ve kaynak süresinin en uygun değerleri belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

SPA-H atmosferik korozyona dayanıklı çelik saçların direnç nokta kaynağı ile elde edilen bağlantılarının çekme-sıyırma testlerinde üç farklı hasar tipinin olduğu gözlemlenmiştir.

Bağlantıların çekme-sıyırma dayanımları arttıkça oluşan hasar tipinin sırasıyla ayrılma, düğmelenme ve yırtılma şeklinde olduğu gözlemlenmiştir.

Kaynak akım şiddeti ve kaynak süresinin artırılmasıyla birlikte bağlantılarda oluşan hasar tipinin ayrılmadan düğmelenme ve yırtılmaya dönüştüğü gözlemlenmiştir.

Bununla birlikte aşırı kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi bağlantılarda fışkırtma oluşumuna neden olduğundan çekme-sıyırma dayanımı değerlerini düşürmektedir. Bu nedenle bu tür bağlantılarda ayrılma ve düğmelenme tipi hasar olduğu gözlemlenmiştir.

Sonuç olarak yırtılma tipi hasarın olduğu bağlantılarda kullanılan kaynak akım şiddeti ve kaynak süresi değerlerinin uygun olduğu söylenebilir. Ancak fışkırtmanın olduğu bağlantılar bunun dışında tutulmalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] ASM, *Metals Handbook: Welding, Brazing and Soldering*, Volume 6, 1993.
- [2] S. Anık, E. S. Anık, M. Vural, *1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [3] M.P., Groover, *Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and*

systems, Third Edition, John Wiley & Sons Inc. 2007.

- [4] D., Özyürek, "An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel", *Materials and Design* 29, pp. 597–603, 2008.
- [5] M., Jou, "Real time monitoring weld quality of resistance spot welding for the fabrication of sheet metal assemblies", *Journal of Materials Processing Technology* 132, pp. 102–113, 2003.
- [6] M., Morcillo, B., Chico, I., Diaz, H., Cano, D., Fuente, "Atmospheric corrosion data of weathering steels", *National centre for metallurgical research (CENIM-CSIC)*, Madrid, Spain, 2013.
- [7] T., Murata, "Weathering steel, in: R.W. Revie (Ed.)", *Uhlig's Corrosion Handbook*, J. Wiley & Sons, New York, 2000.
- [8] ASM, *Metals Handbook: Welding, Brazing and Soldering*, Volume 6, 1993.
- [9] A. M., Al-Mukhtar, Q. Doos, "The Spot Weldability of Carbon Steel Sheet", *Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2013, 6 pages, 2013.
- [10] S.M. Hamidinejad, F. Kolahan, A.H. Kokabi, "The modeling and process analysis of resistance spot welding on galvanized steel sheets used in car body manufacturing", *Material Design* 34, pp.759-767, 2012.
- [11] S. Aslanlar, "The effect of nucleus size on mechanical properties in electrical resistance spot welding of sheets used in automotive industry", *Material Design* 27, pp. 125-131, 2006.
- [12] M.I. Khan, *Ph.D. Thesis*, University of Waterloo, 2007.
- [13] Türk Standartları Enstitüsü: Nokta, dikiş ve projeksiyon kaynaklarının mekanize soyma deneyi için numune boyutları ve yöntem, TS EN ISO 14270, 2002.
- [14] N. Akkas, E. Ilhan, "Effect of Welding Current on Mechanical Properties of Welding Joints in SPA-C Steel Sheets in Resistance Spot Welding", *Acta Physica Polonica A*, Volume 125, No 2, pp. 497-499, 2014. DOI:10.12693/APhysPolA.125.497

- [15] N. Akkas, F. Varol, E. Ferik, E. Ilhan, U. Ozsarac, S. Aslanlar, “Effect of Welding Current on Mechanical Properties of Welding Joints in S235JR(Cu) Steel Sheets in Resistance Spot Welding”, *Acta Physica Polonica A*, Volume 125, No 2, pp. 500-502, 2014. DOI:10.12693/APhysPolA.125.500
- [16] N. Akkas, E. Ilhan, S. Aslanlar, F. Varol, “The Effect Of Nugget Sizes On Mechanical Properties In Resistance Spot Welding Of Spa-C Steel Sheets Used In Rail Vehicles”, *Materials Testing*, Volume 56 (10), pp. 879-883, 2014. DOI: 10.3139/120.110646
- [17] N. Akkas, E. Ilhan, F. Varol and S. Aslanlar. “Welding Time Effect on Mechanical Properties in Resistance Spot Welding of S235JR(Cu) Steel Sheets Used in Rail Vehicles”, *Acta Physica Polonica A*, Volume 129, No:4, pp. 541-543, 2016. DOI: 10.12693/APhysPolA.129.541
- [18] N Akkaş, Welding Time Effect on Tensile–Shear Loading in Resistance Spot Welding of SPA-H Weathering Steel Sheets Used in Railway Vehicles”, *Acta Physica Polonica A*, Volume 131, No:4, pp. 52-54, 2017. DOI: 10.12693/APhysPolA.131.52

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 31.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 16.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.303103	

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızalarına karşı akım sınırlayıcı yapısının en uygun yerleşim yerinin belirlenmesi

Alişan Ayvaz^{*1}, Birsen Boylu Ayvaz¹

ÖZ

Güç sistemlerinde meydana gelen simetrik ve simetrik olmayan kısa devre arızaları şebekenin güç dengesini bozarak güç sistemini kararsız hale getirebilmektedir. Bu durumun önüne geçmek ve sistemin kararlı halde kalma yeteneğini geliştirmek için çeşitli arıza akımı sınırlayıcı yapıları, özellikle yenilenebilir enerji kaynakları içeren güç sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Nitekim, bu çalışmada, güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızalarına karşı süperiletken arıza akımı sınırlayıcı (SAAS) yapısının en uygun yerleşim yeri bulunmaya çalışılmıştır. Güç sistemi modeli olarak 3 makinalı, 9 baralı batı sistemi koordinasyon konseyi (WSCC) test sistemi kullanılmış ve analizler MATLAB'da gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: kısa devre arıza, süperiletken arıza akımı sınırlayıcı, 9 baralı WSCC test sistemi

Determination of optimal placement of fault current limiting device against short circuit faults occur in power systems

ABSTRACT

Symmetrical and unsymmetrical short circuit faults occur in power systems may make the power system unstable by disrupting the power balance of grid. To prevent this situation and improve the ability of power system to remain stable, kind of fault current limiting devices are used in power systems include renewable energy sources especially. Thus, in this study, it is aimed to find optimal placement of superconducting fault current limiter (SFCL) in a power system against the short circuit faults. Western system coordinating council (WSCC) 3 machine, 9 bus test system is used as power system model for this study and analyses are performed in MATLAB software.

Keywords: short circuit fault, superconducting fault current limiter, 9 bus WSCC test system

* Sorumlu Yazar /Corresponding Author

¹ Amasya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, alisan.ayvaz@amasya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç sistemleri, mekanik olarak elde edilen güç ile enerji kaynağı olan elektriksel gücün dengesi sayesinde kararlılığını koruyabilmekte ve güvenli bir şekilde çalışmaktadır. Yetersiz kalan mekanik güç karşısında fazla yüklenme yapılamayacağı gibi, az yük talebi durumunda da fazla mekanik güce ihtiyaç duyulmayacaktır.

Kararlı çalışma koşulları altında şebeke kontrol altındadır ve güç dengesi gerekli yük atma, generatör devreye alma gibi işlemlerle korunmaktadır. Fakat güç sisteminde bu dengeyi bozacak bir takım beklenmedik durumlar oluşabilmektedir. Bu beklenmedik durumlar genel olarak iletim hatlarının kısa devre olması ile meydana gelmektedir. Kısa devre olan iletim hattı ile şebekede akım artışına bağlı olarak yüksek güç talebi doğacaktır. Mekanik gücün de sınırlı oluşu ile bu güç talebi karşılanamayacağından sistemde kararsızlık durumu meydana gelebilmektedir. Bu kısa devre arızasının uzun bir süre boyunca devam etmesi durumunda ise güç sistemi artık geri dönüşü olmayan bir yola girebilmekte ve güç sisteminde büyük çaplı hasarlar meydana gelebilmektedir [1].

Güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızalarından etkileri en ağır olanı üç faz-toprak (3FT) simetrik kısa devre arızasıdır. Üç faz-toprak kısa devre arızası yanında güç sistemlerinde; simetrik olmayan iki faz-toprak (2FT), tek faz-toprak (FT) ve faz-faz (FF) arızaları da meydana gelebilmektedir. Bu çalışmada güç sisteminde meydana getirdiği etkiler sebebiyle en ağır koşulları yaratan 3FT arızası durumu dikkate alınmıştır.

Güç sistemlerinin kısa devre arızalarından zarar görmemesi adına yapılan çalışmalar uzun yıllardır süregelmektedir. Bu çalışmalarda genel öncelik kısa devre akımının sınırlandırılması ve generatör çıkış geriliminin arıza öncesi değerine yükseltilmesidir. Çünkü yüksek kısa devre akımı güç sistemlerindeki yalıtım elemanlarına, koruma elemanlarına, sistem yüklerine vb. zarar verebilmektedir. Diğer yandan ise düşen gerilim yerel ölçekli bir sorun olsa dahi uzun süre devam eden arıza durumunda global ölçekli bir sorun haline dönüşebilmektedir.

Kısa devre akımını sınırlamakta kullanılan ve en çok bilinen yapılardan biri ise süperiletken arıza akımı sınırlayıcı (SAAS)'dır. SAAS, arıza anında

yükselen arıza akımını direnç özelliği ile sınırlayarak güç sisteminin kararlılığına ve güvenilirliğine katkıda bulunmaktadır. Süperiletken arıza akımı sınırlayıcı yapısını, esasen bir direnç olarak düşünülebilir. Bu direnç değeri akım miktarına bağlı olarak değişerek arıza akımına karşı yeterli etkiyi sağlamaktadır [2].

Süperiletken arıza akımı sınırlayıcı yapısına ek olarak kapı kontrollü seri kapasitör (GCSC) ve tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC) yapıları da arıza akımını sınırlamada kullanılan yapılardandır [3]. Akım sınırlayıcı yapıların yanında arıza esnasında sistem reaktif güç isteğini karşılamada kullanılan cihazlar da vardır. Bunlardan senkron var kompanatör (STATCOM) ve statik var kompanatör (SVC) yapıları piyasada en çok bilinenleridir [4, 5]. Arıza esnasında güç sistemine ihtiyaç duyduğu reaktif gücü sağlayarak generatör çıkış geriliminin yükselmesine ve buna bağlı olarak güç sisteminin kararlı halde kalmasına olumlu yönde etki etmektedir.

Bu çalışmada, IEEE tarafından referans olarak sunulan 9 baralı, 3 makinelili bölgesel bir güç sisteminin herhangi bir yerinde meydana gelebilecek olan kısa devre arızasına karşı güç sisteminin kararlılığını en iyi şekilde sağlayacak olan SAAS yapısı yerleşim noktasının bulunması adına bir yöntem önerilmektedir. Farklı iletim hatlarında ayrı ayrı olarak 3FT arızası uygulanarak en kritik arıza konumunun bulunması, bu çalışmanın ilk etabını oluşturmaktadır. Daha sonrasında ise bu noktaya yerleştirilen SAAS yapısı ile güç sisteminde bulunan generatörlerin akım ve gerilim değerlerinin nasıl değiştiği gözlemlenmeye çalışılmıştır.

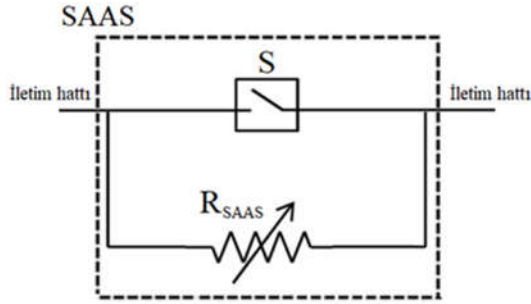
Literatürde, SAAS yapısının en uygun yerleşim noktasının bulunması adına yapılan çalışmaların genel olarak iletim hattı akımı değişimini dikkate aldığı görülmektedir. Çalışma [6], [7] ve [8]'de, arıza sonrası iletim hattı akım artışı dikkate alınarak analizler yapılmış ve SAAS yapısı yerleşim yeri bulunmaya çalışılmıştır. Fakat bu çalışmalarda formül tabanlı sayısal bir hesaplama üzerinden çözüme yönelik bir analize yer verilmemiştir. Diğer yandan ise arıza sonrası generatör rotor açısı ve generatör terminal gerilimi değişimini de dikkate alan çalışmalar bulunmaktadır [9, 10, 11]. Bu çalışmalarda, rotor açısı ve gerilim değişimine bağlı sadece görsel analizler veya görsel ile birlikte sayısal analizler verilmiş fakat akım değişimine bağlı formül tabanlı sayısal analizlere değinilmemiştir. Literatürden farklı olarak bu çalışmada, arıza

sonrası akım değişimi dikkate alınarak akım artışına bağlı görsel analizler ile formül tabanlı sayısal analizler dikkate alınarak en iyi SAAS lokasyonu bulunmaya çalışılmıştır. Ayrıca görsel olarak generatör terminal gerilimi değişimleri de verilerek tespit edilen SAAS yerleşim noktasının güç sistemi kararlılığına olumlu etkisinin daha iyi anlaşılması sağlanmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmanın planı şu şekildedir: Bölüm 2’de SAAS yapısı hakkında bilgiler verilmiştir. Çalışmanın gerçekleştirildiği güç sistemine ait bilgiler Bölüm 3’tedir. Bölüm 4’de en kritik kısa devre arıza noktasının bulunması için önerilen yöntem anlatılmaktadır. Bölüm 5’te simülasyon sonuçları sonucu elde edilen görsel ve sayısal analizler verilmiştir. Son olarak ise Bölüm 6’da bu çalışmadan çıkarılan sonuçlar sunulmuştur.

2. SÜPERİLETKEN ARIZA AKIMI SINIRLAYICI (SUPERCONDUCTING FAULT CURRENT LIMITER)

Süperiletken arıza akım sınırlayıcı; güç sisteminde iletim hatlarına seri olarak bağlanan, güç sistemi kararlılığını geliştirici ve güç sistemi güvenliğini arttırıcı bir yapıdır. Arıza esnasında direnç etkisi ile arıza akımını sınırlayarak güç sistemi elemanlarının zarar görmesini engellemekte ve generatör çıkışında aşırı akım sonucu meydana gelen gerilim düşümünü önlemektedir.



Şekil 1. SAAS yapısı şematik gösterimi (Schematic display of SFCL device)

Şekil 1’de iletim hattına seri olarak bağlanmış halde SAAS yapısı şematik modeli görülmektedir. Burada “S”, akım artışına bağlı bir kontrollü anahtar ve R_{SAAS} ise arıza akımına karşı SAAS yapısının gösterdiği direnç değeridir. SAAS yapısının gösterdiği direnç değeri 3 aşama şeklinde değişmektedir. Bu aşamalar; süperiletken durum, akı akışı durumu ve normal iletkenlik durumu şeklindedir [11, 13]. Süperiletken durumda iletim hattındaki akım yoğunluğu değeri (J) kritik akım yoğunluğu değerinin (J_K) altında ve sıcaklık değeri (T) kritik sıcaklık değerinin (T_K)

altındadır. Bu durumda “S” anahtarı kapalı konumdadır ve SAAS yapısının gösterdiği direnç değeri 0 (sıfır)’dır. Akı akışı durumunda iletim hattındaki akım yoğunluğu değeri kritik akım yoğunluğu değerinin üstünde, fakat sıcaklık değeri kritik sıcaklık değerinin altındadır. Bu durumda “S” anahtarı açık konumda ve R_{SAAS} değeri Denklem (1)’deki gibi akım yoğunluğunun fonksiyonu şeklindedir.

$$R_{SAAS} = f[(J/J_K)^n] \quad (1)$$

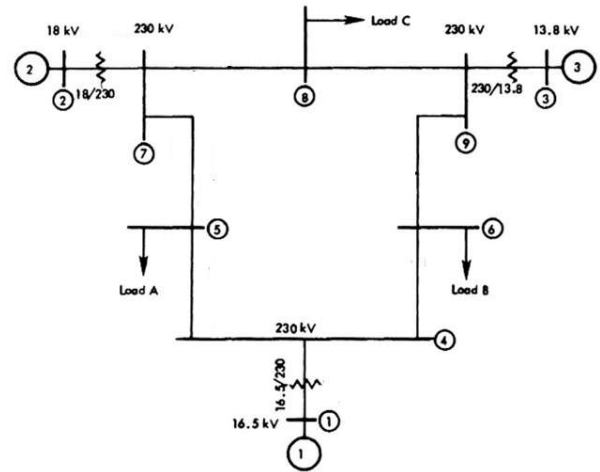
burada n değeri genellikle 20’nin üzerinde seçilen bir sabittir [13]. Bu çalışmada n değeri 20 olarak alınmıştır.

Son aşama olarak, normal iletkenlik durumunda ise hem iletim hattındaki akım yoğunluğu değeri hem de sıcaklık değeri kritik değer üstündedir ve R_{SAAS} değeri sıcaklığın fonksiyonu şeklindedir. Kritik akım yoğunluğu aşıldıktan yaklaşık 1-2 mili saniye sonra kritik sıcaklık değeri de aşılır ve direnç değeri sıcaklıkla lineer eğilim içinde değişir.

R_{SAAS} direnç değerinin aşamalara bağlı olarak değişimi Denklem (2) ile de ayrıca görülebilmektedir.

$$R_{SAAS} = \begin{cases} 0, & (J < J_K \text{ ve } T < T_K) \\ f[(J/J_K)^n], & (J > J_K \text{ ve } T < T_K) \\ f[T], & (J > J_K \text{ ve } T > T_K) \end{cases} \quad (2)$$

3. 9 BARALI, 3 MAKİNALI WSCC GÜÇ SİSTEMİ (9 BUS, 3 MACHINE WSCC POWER SYSTEM)



Şekil 2. 9 baralı WSCC güç sistemi (9 bus WSCC power system)

Bu çalışmada kullanılan güç sistemi 9 adet bara, 3 generatör, 3 adet yük, 3 adet transformatör ve 6 adet iletim hattından oluşmaktadır. Şekil 2’de bu

güç sistemine ait tek hat şeması görülmektedir. Bu güç sistemine ait diğer bazı bilgiler Tablo 1 ve 2’de verilmiştir [12].

Tablo 1. Generatör verileri (Generator data)

Genaratör No	Aktif Güç Değeri
1	Referans Generatör
2	163 MW
3	85 MW

Tablo 2. İletim hattı verileri (Transmission line data)

İletim Hattı	R+jX	B/2
L ₄₋₅	0.01+j0.085	j0.088
L ₄₋₆	0.017+j0.092	j0.079
L ₅₋₇	0.032+j0.161	j0.153
L ₆₋₉	0.039+j0.17	j0.179
L ₇₋₈	0.0085+j0.072	j0.0745
L ₈₋₉	0.0119+j0.1008	j0.1045

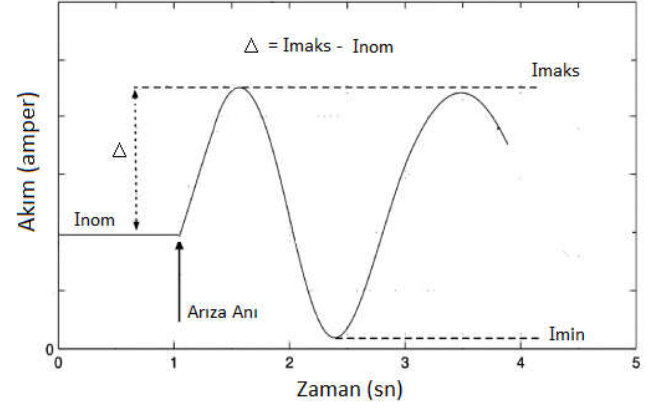
4. KRİTİK KISA DEVRE ARIZA NOKTASININ BELİRLENMESİ (DETERMINATION OF THE CRITICAL SHORT CIRCUIT FAULT POINT)

Güç sisteminde meydana gelen kısa devre arızaları, türüne ve arıza oluşum noktasına göre etkileri farklı olmaktadır. Arıza türü olarak en ağır koşullar 3FT kısa devre arızasında görülmekteyken, arızanın meydana gelme konumu güç sisteminden güç sistemine değişiklik gösterebilmektedir. Nitekim, literatürdeki çalışmalarda da farklı güç sistemleri için olası 3FT arızası dikkate alınarak analizler dikkate alınmıştır [9, 11, 14]. Bu çalışmada örnek güç sistemi modeli olan 9 baralı WSCC test sisteminin farklı iletim hatlarına 3FT arıza uygulanarak generatör baraları akım ve gerilim değişimleri görsel olarak gözlemlenmiştir.

Literatürdeki çalışmalarda arıza sonrası akım artışının önemi dikkate alınarak SAAS yapısı en uygun yerleşim yeri akım değişimi simülasyon görsel ve ölçüm analizlerine göre bulunmaya çalışılmıştır [6, 7, 8, 9]. Bu çalışmada, literatürden farklı olarak arıza sonrası meydana gelen akım artışı indeks değeri olarak tanımlanmış ve bu

indeks değeri dikkate alınarak en uygun SAAS yerleşim yeri tespiti yapılmıştır.

Şekil 3’te iletim hattı akımının arıza durumundaki değişimi görülmektedir. Burada I_{maks} , arıza anı akım maksimum değerini; I_{min} , arıza anı akım minimum değerini; I_{nom} , iletim hattı nominal akım değerini ve Δ , arıza anı maksimum akım değeri ile iletim hattı nominal akımı arasındaki farkı göstermektedir.



Şekil 3. Arıza akımı zamana bağlı değişimi (Time dependent change of fault current)

Arıza akımının artış oranı (α) ve maksimum arıza akımı değeri ilgili generatörün meydana gelen arızadan ne derecede etkilendiği hakkında bize net bilgiler vermektedir. Bu sebeple bu çalışmada da akımın değişim oranı ve maksimum arıza akımı değerine bağlı olarak kritik arıza oluşum noktasının tespiti temel alınmıştır. Ayrıca gerilim düşümü değerleri de akım değişimi analizlerine ek olarak yorum yapmak için incelenmiştir. Denklem (3), (4) ve (5)’de kritiklik indisinin (K_{i-j}) eldesi için oluşturulan eşitlikler görülmektedir.

$$\alpha = (I_{maks} - I_{nom})/I_{nom} \quad (3)$$

$$\alpha_{toplamlam} = \sum_{i=1}^3 \alpha_i \quad (4)$$

$$K_{i-j} = I_{maks}' \cdot \alpha_{toplamlam} \quad (5)$$

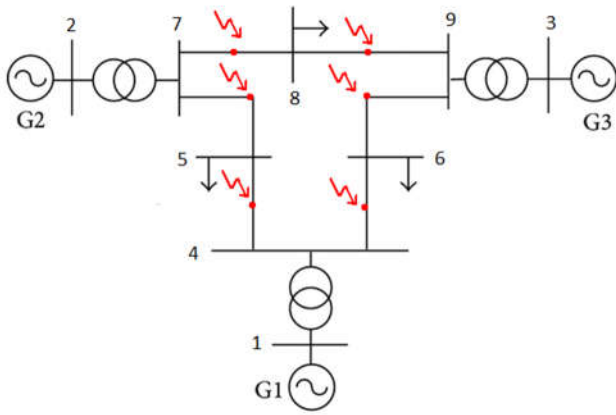
burada I_{maks}' , ilgili arıza noktası için 3 generatörde meydana gelen akım artışlarından en yüksek olanın değerini simgelemektedir. Bunun sebebi her ne kadar akım değişim oranı önemli olsa da akımın maksimum değeri de güç sistemi elemanlarının dayanıklılığı açısından bir kritiklik ifade etmektedir. Diğer yandan $\alpha_{toplamlam}$, ilgili arıza noktası için 3 generatörde meydana gelen akım değişimlerine bağlı hesaplanan α değerlerinin toplamına eşittir.

K_{i-j} değeri, güç sisteminin 6 farklı noktasına uygulanan kısa devre arızalarından hangisinde en yüksek değeri veriyorsa o nokta bu güç sistemi için

en kritik arıza noktası olacaktır. K_{i-j} değerini bulmada i ve j parametreleri 1'den 9'a kadar olan bara numaralarını, $i-j$ ifadesi ise i 'nci ve j 'nci bara arasındaki iletim hattını ifade etmektedir. Bu analize ek olarak ilgili generatör baralarındaki gerilim düşümleri de kritik arıza noktası belirlenmesi konusundaki yorumlamalarda yardımcı olacaktır.

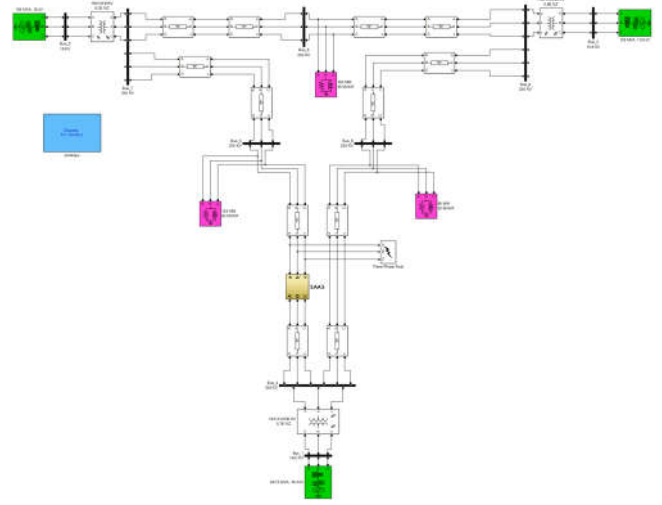
Kritik arıza noktasının belirlenmesinin ardından ilgili noktaya yerleştirilecek olan SAAS yapısının güç sisteminin kararlılığına ve güvenilirliğine etkisi görsel ve analitik olarak incelenebilecektir.

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI VE ANALİZLER (SIMULATION RESULTS AND ANALYSES)

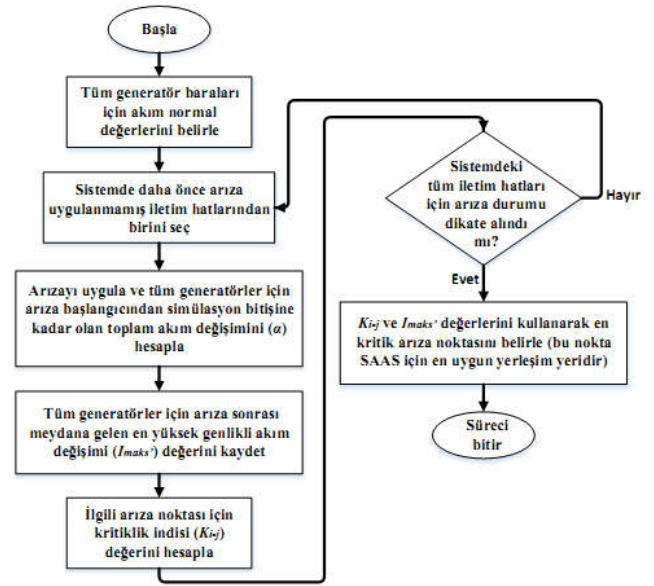


Şekil 4. Güç sistemi kısa devre arıza noktaları (Power system short circuit fault points)

Şekil 4'te 9 baralı WSCC güç sistemi ve farklı iletim hatlarına uygulanmış kısa devre arızaları görülmektedir. Simülasyon çalışmasında ilgili iletim hattı için kısa devre arızasının iletim hattının tam orta noktasında olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca uygulanan bu kısa devre arızasının $t=0.1$ saniye simülasyon zamanında başlayıp 100 ms sürdüğü varsayılmıştır. Analizler için Şekil 4'te verilen güç sistemi, Şekil 5'te görüldüğü üzere MATLAB/Simulink [15] programında oluşturulmuş ve farklı iletim hatlarına ayrı ayrı 3FT kısa devre arızaları uygulanarak en kritik arıza noktasının bulunması amaç edinilmiştir. Bu sürece ait akış diyagramı Şekil 6'da görülmektedir. En kritik arıza noktasının bulunması sonrasında ise modellenen SAAS yapısı en kritik arıza noktası olan iletim hattına seri bağlanarak SAAS yapısının güç sistemine olan olumlu etkileri incelenmiştir.



Şekil 5. Güç sistemi MATLAB/Simulink modeli (MATLAB/Simulink model of power system)



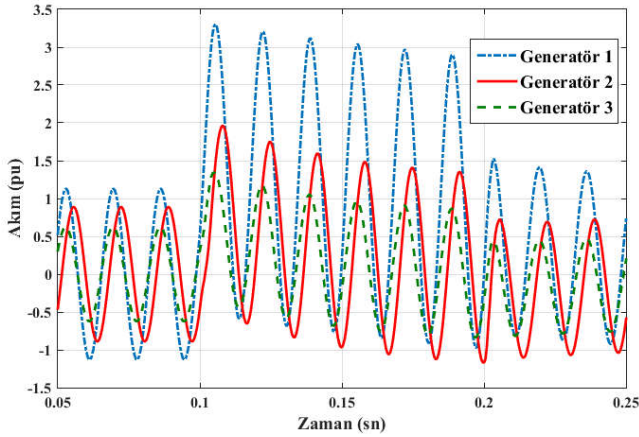
Şekil 6. İşlem sürecine ait akış diyagramı (Flow chart belonging to operation process)

Tablo 3'te modellenen güç sistemindeki 6 iletim hattına ait simülasyon çalışmaları sonucu elde edilen α_{toplam} , I_{maks}' ve K_{i-j} değerleri görülmektedir.

Tablo 3. Simülasyon sonuçları (Simulation results)

İletim Hattı	α_{toplam}	I_{maks}'	K_{i-j}
L4-5	4.26	3.3 pu	14.06
L4-6	4.16	3.22 pu	13.4
L5-7	4.03	2.57 pu	10.36
L6-9	3.89	2.48 pu	9.64
L7-8	4.63	2.65 pu	12.27
L8-9	4.5	2.31 pu	10.4

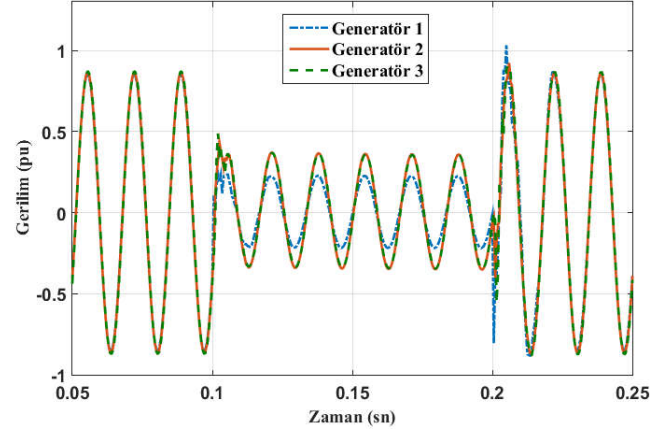
Tablo 3'deki veriler incelendiğinde arıza esnasında en fazla akım değişiminin L₇₋₈ iletim hattında olduğu ama buna karşılık en yüksek arıza akımı değerinin ise L₄₋₅ iletim hattında meydana geldiği görülmektedir. Nihai sonuçta ise kritiklik indisi en yüksek olarak L₄₋₅ iletim hattında elde edilmiştir. Bu sonuçla en kritik kısa devre arıza noktasının L₄₋₅ iletim hattı olduğu söylenebilmektedir. Şekil 7'de L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen 3FT arıza sonrası generatör baraları arıza akımı değişimleri görülmektedir. Ayrıca şekilden en yüksek arıza akımının 1 no'lu generatör barasında meydana geldiği anlaşılmaktadır.



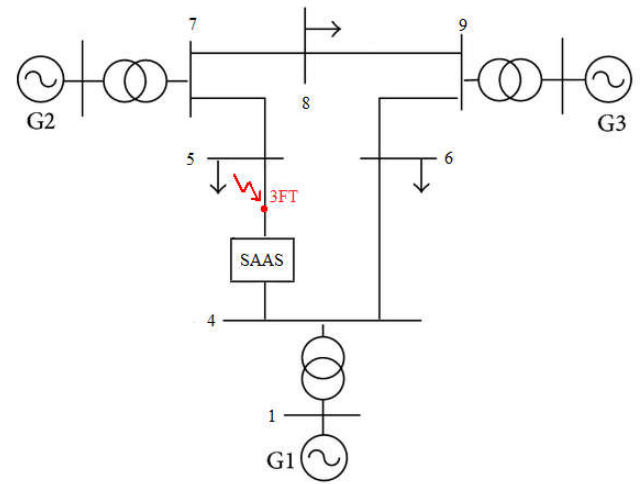
Şekil 7. L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen kısa devre arızası sonucunda generatör barası akım değişimleri (Generator bus current changes as a result of short circuit fault on the transmission line L₄₋₅)

Şekil 8'de L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen 3FT arıza sonrası generatör baraları gerilim değerlerinin değişimi görülmektedir. Arıza öncesinde 0.9 pu civarında değere sahip olan generatör bara gerilimleri arıza sonrasında 0.5 pu değerinin altına düşmüştür. Özellikle generatör 1 barasında gerilim düşümü diğer generatörlere oranla daha fazla olmuştur. Bunun sebebi ise L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen arızanın generatör 1 barasında yüksek akım artışına neden olduğundan kaynaklanmaktadır.

Şekil 9'da simülasyon için kullanılan 9 baralı WSCC güç sistemi, L₄₋₅ iletim hattı üzerine yerleştirilen SAAS yapısı ile birlikte görülmektedir. Bu güç sistemi için en kritik arıza noktası olan L₄₋₅ hattı üzerinde tekrardan 3FT arızası uygulanarak SAAS yapısının güç sistemine olan katkıları incelenmiştir.



Şekil 8. L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen kısa devre arızası sonucunda generatör barası gerilim değişimleri (Generator bus voltage changes as a result of short circuit fault on the transmission line L₄₋₅)

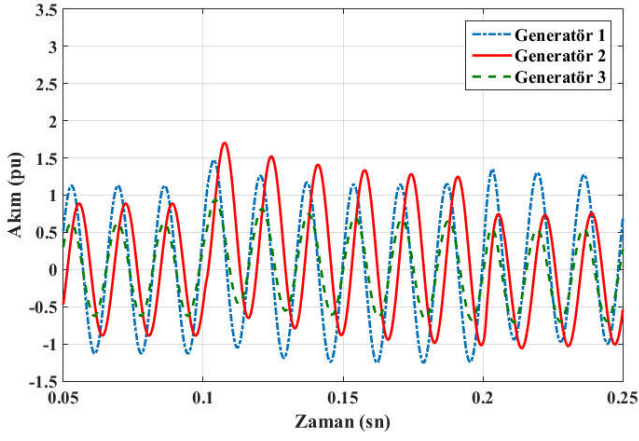


Şekil 9. SAAS yapısının dahil olduğu güç sistemi modeli (Power system model including SFCL device)

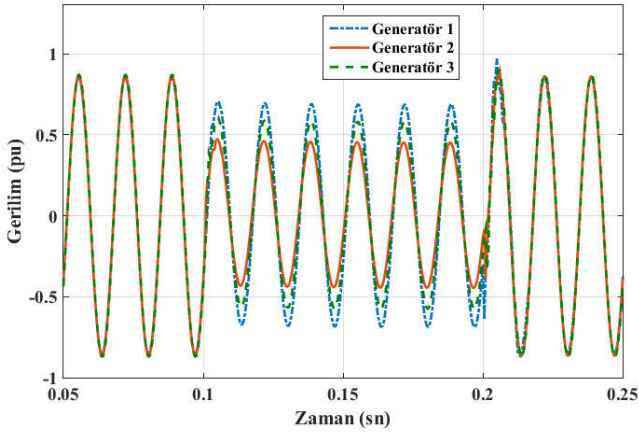
Şekil 10'da SAAS yapısı içeren güç sistemi için L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen kısa devre arızası sonucunda generatör barası akım değişimleri görülmektedir. SAAS yapısı güç sistemine yerleştirilmeden önce meydana gelen arıza sonrasında generatör 1 barası maksimum akım değeri 3.3 pu iken SAAS yapısı yerleştirildikten sonra 1.5 pu civarına düşmüştür. Aynı şekilde diğer generatör baraları için de düşümler yaşanmış ama arızadan en çok etkilenen generatör 1 için maksimum arıza akım düşümü daha fazla olmuştur. Diğer yandan SAAS yapısının etkisi ile generatör baralarında gerilim düşümleri azalmış ve Şekil 11'de görüldüğü üzere arıza süresince 0.5 pu değerinin üzerinde kalmıştır.

Şekil 12 ve 13'de SAAS yapısının generatör 1 üzerindeki etkisini daha iyi anlayabilmek adına SAAS yapısı içermeyen eski güç sistemi modeli ve SAAS yapısı içeren yeni güç sistemi modeli karşılaştırılmaktadır. SAAS yapısının generatör 1

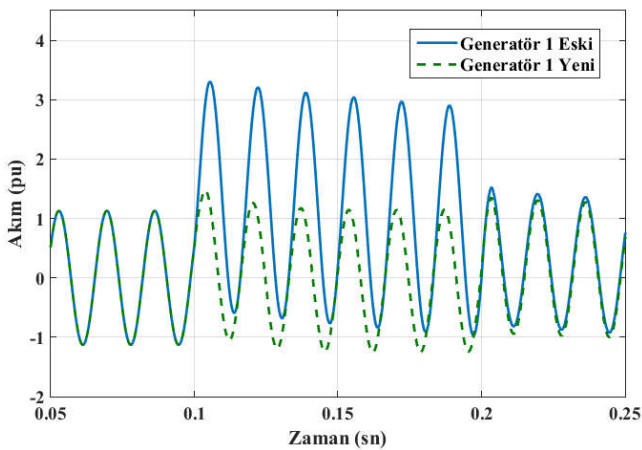
üzerindeki etkisinin oldukça yüksek olduğu şekillerden rahatlıkla anlaşılmaktadır.



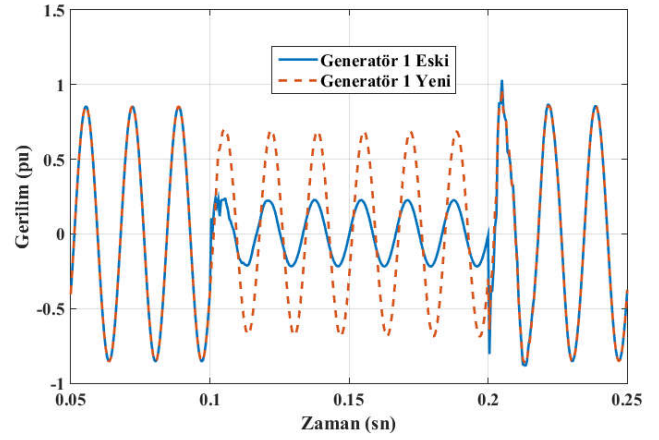
Şekil 10. SAAS yapısı içeren güç sistemi için L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen kısa devre arızası sonucunda generatör barası akım değişimleri (Generator bus current changes as a result of short circuit fault on the transmission line L₄₋₅ for power system including SFCL)



Şekil 11. SAAS yapısı içeren güç sistemi için L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen kısa devre arızası sonucunda generatör barası gerilim değişimleri (Generator bus voltage changes as a result of short circuit fault on the transmission line L₄₋₅ for power system including SFCL)



Şekil 12. SAAS yapısı içeren ve içermeyen güç sistemi modeli için L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen kısa devre arızası sonucunda generatör 1 barası akım değişimi (Generator bus current changes as a result of short circuit fault on the transmission line L₄₋₅ for power system with and without SFCL)



Şekil 13. SAAS yapısı içeren ve içermeyen güç sistemi modeli için L₄₋₅ iletim hattında meydana gelen kısa devre arızası sonucunda generatör 1 barası gerilim değişimi (Generator bus voltage changes as a result of short circuit fault on the transmission line L₄₋₅ for power system with and without SFCL)

Tablo 4'te güç sisteminde SAAS yapısının bulunduğu ve bulunmadığı durumlar için hesaplanan α_{toplam} , I_{maks}' ve K_{i-j} değerleri görülmektedir. SAAS yokken kritiklik indisi değeri 14.06 iken SAAS yapısının sisteme dahil olduğu durumda büyük bir farkla 2.92'ye düşmüştür. Aynı şekilde I_{maks}' değeri de 3.3 pu'dan 1.7 pu değerine düşerek güç sistemine zarar verecek aşırı akım engellenmiştir.

Tablo 4. Güç sisteminde SAAS varken ve yokken simülasyon sonuçları (Simulation results for power system with and without SFCL)

Güç Sistemi Durumu	α_{toplam}	I_{maks}'	K_{i-j}
SAAS yok	4.26	3.3 pu	14.06
SAAS var	1.71	1.7 pu	2.92

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada güç sistemlerinde meydana gelen kısa devre arızalarına karşı süperiletken arıza akımı sınırlayıcı (SAAS) yapısının kullanılarak güç sisteminin kararlılığının ve güvenilirliğinin artırılması amaç edinilmiştir. Bu amaçla örnek güç sistemi modeli olan 9 baralı WSCC test sistemi üzerinde ilk olarak en kritik arıza noktası bulunmaya çalışılmıştır. En kritik arıza noktasının bulunması için en ağır güç sistemi şartlarını yaratan üç faz-toprak (3FT) arızası test sisteminde bulunan 6 adet iletim hattına ayrı ayrı olarak uygulanmıştır. Uygulanan bu arızalar sonucunda generatör baralarındaki akım ve gerilim değerleri incelenmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntem yardımıyla arıza sonrası akım değişimine bağlı

olarak bulunan kritiklik indisi (K_{i-j}) değeri, hangi iletim hattı için en yüksek değerdeyse o iletim hattı örnek güç sistemi modeli için en kritik arıza noktası olarak seçilmiştir. Daha sonrasında ise bu iletim hattına yerleştirilen SAAS yapısı ile 3FT arıza durumunda generatör baraları akım ve gerilim değişimleri tekrardan incelenmiştir. SAAS yapısının arıza durumunda güç sistemine etkisi görsel ve analitik veriler ile sunulmuştur.

Çalışmada sunulan görsel ve analitik veriler ışığında, literatürdeki çalışmalardan farklı olarak uygulanan akım artışına bağlı arıza kritik nokta tespiti etkili bir çözüm sunmaktadır. Nitekim, SAAS yapısının bulunan bu kritik noktaya yerleştirilmediği durumda arıza sonrası akım değeri 3 p.u. değerini aşarken, SAAS yapısının kullanıldığı durumda hemen hemen 1.2 p.u. değerinde sınırlı kalmıştır. Aynı şekilde arıza sonrası generatör terminal gerilimlerindeki düşüş de SAAS yapısının arıza kritik noktasına yerleştirilmesiyle ciddi şekilde azalma göstererek arıza öncesi değerine yakın seyir göstermiştir. Bu sonuçlardan çıkarımla, bu çalışmada tanımlanan akıma bağlı kritik nokta tespiti diğer bir kararlılık parametresi olan terminal gerilimleri açısından da ciddi anlamda olumlu sonuçlar yaratmıştır.

REFERENCES

- [1] J. Machowski, J. W. Bialek, and J. R. Bumby, *Power System Dynamics: Stability and Control*, 2nd ed. West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2009, pp. 6–7.
- [2] F. Zheng, C. Deng, and L. Chen, "Transient Performance Improvement of Microgrid by a Resistive Superconducting Fault Current Limiter," *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, June 2015.
- [3] H. A. Mohammadpour, A. Ghaderi, H. Mohammadpour, and M. H. Ali, "Low voltage ride-through enhancement of fixed-speed wind farms using series FACTS controllers," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 9, pp. 12-21, March 2015.
- [4] S. M. Muyeen, "A Combined Approach of Using an SDBR and a STATCOM to Enhance the Stability of a Wind Farm," *IEEE Systems Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 922-932, Sept. 2015.
- [5] A. Ayvaz and M. Ozdemir, "A combined usage of SDBR and SVC to improve the transient stability performance of a PV/wind generation system," *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, pp. 1-6, 2016.
- [6] M. Jangale and K. D. Thakur, "Optimum Positioning of Superconducting Fault Current Limiter for Wind Farm Fault Current in Smart Grid," *2017 International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology*, pp. 312-316, 2017.
- [7] A. A. Kalage, N. D Ghawghawe and T. V. Deokar, "Optimum Location of Superconducting Fault Current Limiter to Mitigate DG Impact," *International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics*, pp. 1-4, 2016.
- [8] A. Jain, V. K. Dubey, G. Jawale, H.A. Mangalvedekar and K. Kanakgiri, "Feasibility Analysis for Optimal Placement of SFCL in a Loop Network: A Case Study," *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*, pp. 1-6, 2016.
- [9] G. Didier, J. Lévêque, and A. Rezzoug, "A Novel Approach to Determine the Optimal Location of SFCL in Electric Power Grid to Improve Power System Stability," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 28, no. 2, May 2013.
- [10] M. E. Elshiekh, D.-E. A. Mansour, and A. M. Azmy, "Improving Fault Ride-Through Capability of DFIG-Based Wind Turbine Using Superconducting Fault Current Limiter," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, Dec. 2012.
- [11] D.-E. A. Mansour, and D. M. Yehia, "Analysis of 3-Phase Superconducting Fault Current Limiters in Power Systems with Inhomogeneous Quenching," *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, vol. 28, no. 3, June 2013.
- [12] P. M. Anderson and A. A. Fouad, *Power System Control and Stability*, 2nd ed. New York: IEEE Press, 2003.
- [13] K. Nam, C. Lee, D. K. Park, T. K. Ko, and B.-Y. Seok, "Thermal and electrical

analysis of coated conductor under AC over-current,” *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, pp. 1923–1926, June 2007.

Electric Power System with Distributed Generations (DGs),” *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, June 2013.

[14] H.-C. Jo, S.-K. Joo, and K. Lee, “Optimal Placement of Superconducting Fault Current Limiters (SFCLs) for Protection of an

[15] SimPowerSystems User’s Guide, The Math Works, Inc 2000.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 20.11.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 20.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.356466	

Yalın üretimin bankacılık sektörüne uyarlanması ve bir benzetim çalışması

İbrahim Çil^{1*} ve SelinYalçın²

ÖZ

Günümüzde bir banka şubesini karlı bir biçimde yönetmek geçmiştekinden daha güç bir hal almıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte müşterilerin talepleri karşılamak daha kolay hale gelmiştir. Bu yönde, yalın düşünce bankalara büyük kolaylık sağlamaktadır. Yalın düşünce pek çok alanda başarıyla uygulanmasına rağmen, bankacılık alanında yeterince uygulanmadığı görülmektedir. Bu nedenle yalın düşüncenin bankacılık uygulamalarına da uyarlanması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, yalın düşüncenin bankacılık alanında uygulanmasıyla bankaların hizmet ve kalite seviyelerinin artırılmasıdır. Üretim ortamında yapılan uygulamaları doğrudan bankacılık sektörüne uyarlamak yetersiz olacaktır. Bu çalışmada, yalın uygulama yöntemlerinin bankacılık sektörüne uyarlanması ve bir benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmasıyla bankacılık sektöründeki israf olarak nitelendirilen faaliyetler en aza indirilmeye çalışılmıştır. Simülasyon modelinde hizmet sektöründe yer alan ve katma değer yaratmayan faaliyetlerin gözlenmesi sağlanmış, yalın düşüncenin yardımıyla atıklar önlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: yalın düşünce, yalın bankacılık, hizmet sektörü, benzetim

Adaptation of lean production to the banking sector and a simulation study

ABSTRACT

Nowadays, managing a bank branch profitably has become more difficult than it was in the past. With the development of technology, it has become easier for customers to meet their demands. In this direction, lean thinking provides great convenience to the bank. Even though lean thinking has been successfully applied to many areas, it seems that it has not been sufficiently implemented in banking. For this reason, it is necessary to adapt lean thinking to banking applications. The aim of this study is to improve the service and quality levels of banks by applying lean thinking in the field of banking. It would be inadequate to adapt the applications made in the production environment directly to the banking sector. In this study, adaptation of lean application methods to the banking sector and a simulation study were carried out. With the simulation study, it was tried to minimize the activities which are regarded as waste in the banking sector. It has been ensured that activities present in service sector and non-value adding have been observed in the simulation model and wastes have been prevented with the help of the lean thinking.

Keywords: lean thinking, lean banking, service sector, simulation

¹ Sakarya Üniversitesi, icil@sakarya.edu.tr

* Corresponding Author

² Beykent Üniversitesi, selinyalcin@beykent.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde bir banka şubesini karlı bir biçimde çalıştırıp yönetmek geçmiştekinden daha zor bir hal almıştır. Bankacılık hizmetlerini etkin olarak yerine getirmek için bankalar hem yeni yönetim yaklaşımlarını, hem de yeni ürün ve hizmetleri etkin bir şekilde uygulamaya koymak zorundalar. Müşteriler daha geniş bir çeşitlilikte hizmet talep ederken, yeni teknolojilerle imkân ve kolaylıklar her geçen gün artmaktadır. Bu yönde yalın yaklaşım bankalarda birçok avantaj sağlamakta ve bir bankanın hem ön ve hemde arka ofislerinde işlemleri etkin yönetmek için güçlü araçlar ve etkin çözümler sunmakta, operasyon maliyetlerini ise önemli ölçüde azaltmaktadır. Yalın bankacılık yaklaşımı akış ve çevrim sürelerinde önemli kazanç sağlarken, hata önleme ve geliştirilmiş operasyonel kontroller, azaltılmış risk, daha az hata ve daha yüksek kalite gibi tüm bu iyileştirmelerle de müşteri memnuniyetini artırma potansiyeline sahiptir. Yalın yaklaşım, müşteri gözüyle hizmet süreçlerini iyileştirme üzerine odaklanır [1]. Özellikle çalışanların sürece katılımını sağlayarak, morallerini artırır. Başarılı bir yalın dönüşüm gayreti, performansı artırır ve kendine güvenen, yetkilendirilmiş ve güçlendirilmiş çalışanlarla sürekli iyileştirme konusunda bir zihniyet değişimi ve iş kültürünün oluşumunu sağlar [2] [3]. Yalın düşünce ve Altı Sigma gibi yönetim yaklaşımları bankalar için de, tüm bu hedefleri gerçekleştirmede ve süreçleri iyileştirmede büyük katkı sağlamaktadırlar. Böylece yöneticiler, müşteri hizmetlerinde mükemmelliği koruyarak maliyetleri düşürmek için iş süreçlerini optimize edebilme fırsatı yakalamaktadırlar [4].

Hizmet sektörleri arasında özellikle de bankacılık hizmetlerinde müşteriler anında hizmet almak istemektedirler. Kendinden önce başka müşteri var ise sıra (kuyruk) oluşturarak beklemek zorundadırlar. Bu süreçte bazı müşteriler kuyruktan ayrılabilir, b.azı müşteriler memnuniyetsiz olabilir. Hizmet sektörünün en büyük sorunlarından biri kuyruk nedeni ile müşterinin memnuniyetsiz ayrılmasından doğan müşteri kayıplarıdır. Beklemek yalnızca insan yaşamında değil, diğer işletmelerin de faaliyetlerinde devamlı olarak karşılaştıkları bir sorundur. Örneğin, hava meydanlarında uçakların iniş kalkışları, otomobillerin kara yollarındaki köprü ve tünel girişlerinde sıra beklemeleri sık

görülen problemlerdir. Beklemek tüm toplumları her yönüyle bir bütün olarak etkileyen önemli bir sorundur. Bu sorunun bilimsel olarak araştırılması ve sıra bekleme sistemlerinin de bu araştırmalar ışığı altında düzenlenmesi gerekir [5]. Yalın düşünce birçok alanda uygulamaları karşın, bankacılık alanı özeline inildiğinde yeterli düzeyde uygulamanın olmadığı görülmektedir. Hizmet sektöründe israf olarak nitelendirilen bekleme sürelerinin azaltılması için yalın uygulama yöntemlerinin bankacılık sektörüne uyarlanması oldukça önemlidir.

Yalın düşünce, değer olarak tanımlanan faaliyetleri belirlemek ve müşterinin taleplerini etkili bir biçimde yerine getirmek için faaliyetlerin daha etkili biçimde uygulanmasını sağlar. Yalın düşünce, kısıtlı olan kaynakların en verimli şekilde kullanılmasını sağlayarak, daha fazla ürün ve hizmet sunmayı hedeflemektedir. Yalın düşünce aynı zamanda, müşteriden gelen taleplerin daha hızlı ve etkin bir biçimde karşılanmasını sağlar [6]. Bu kavramın bankacılık hizmet alanında uygulanması israfın azaltılması, hizmet kalitesinin artması ve rekabet ortamında ayakta kalmayı sağlayacaktır.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Yalın yaklaşım, 1980'li yıllara kadar az sayıda araştırmacı ve Toyota gibi yalnızca birkaç üretim kuruluşu tarafından biliniyordu ve uygulanıyordu. 2000'lerin sonlarında bu gerçek değişti ve Yalın düşünce ve uygulamaları, pek çok kuruluşta ve farklı alanlarda, birçok araştırmacı tarafından kıtalar arasında yayıldı [7] [8] [9].

Üretim alanından başlayarak hizmet alanına doğru değişen geniş bir yelpazede kendine uygulama alanı buldu. Son zamanlarda yapılan bir ankete göre, yalın metodolojiyi uygulayan kuruluşların %17'si hizmet organizasyonudur [10]. Technology Forecasters firması tarafından yapılan bir araştırmada incelenen şirketlerinin %63'ünün Yalın üretim ile genel maliyetlerini düşürdüğünü göstermektedir. Buna ek olarak, yalın teknikleri uygulamayan şirketlerle kıyaslandığında, Yalın anlayışa sahip şirketlerin %75'inin, %5'in üstünde net bir kâr artışı sağladığı görülmüştür [11].

Kurumlarda yalın kültürün dahada geliştirilmesiyle, bu şirketlerin % 10-15'lik bir kar marjına ulaşabileceği belirtilmektedir. Daha düşük

maliyet ve hata oranlarından kazanç sağlamakla kalmaz, yalın yaklaşımın başarıyla uygulanması verimlilikte % 15-25'lik bir iyileşme ve çevrim süresinde %30 - %60'lık bir artış sağlayabilir.

Smith ve ark. (2017) bir hizmet kuruluşunda müşteriyle doğrudan ilişkili süreçlerde yalın uygulama çalışmasının sonuçlarını değerlendirmektedirler. Bu araştırmada, doğru uygulandığında yalın düşünce daha iyi süreç verimliliği, daha iyi bir müşteri emnuniyeti sağlayabileceğini ortaya koymaktadır [12]. İslam (2016) yaptığı çalışmada altı sigma metodolojisini kullanarak kredi kartı hesabı açma sürecinde ele almaktadır [13]. Stadnicka ve Ratnayake (2017) hizmet organizasyonlarında performansın artırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmektedirler [14]. Bu kapsamda telekomünikasyon endüstrisinde değer akış analizine dayanan bir vaka çalışması sunulmaktadır. Hadid ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada sosyo-teknik bir bakış açısıyla yalın düşüncenin hizmet sektörü için neler sağlayabileceğini göstermektedirler [15]. Asnan ve arkadaşları (2015) yaptıkları çalışma, hizmet sektöründe yalın uygulamaların nasıl yapılması gerektiğiyle ilgilidir [16]. Farrington ve arkadaşları (2018) konaklama ve turizmde sürekli iyileştirme metodolojileri ve uygulamaların nasıl olması gerektiğini açıklamaktadırlar [17]. Radnor ve Walley (2008) yalın kavramın hizmet sektörüne uygulanmasıyla ilgili çalışmalardan örnekler sunmaktadır [18]. Arbos (2002), telekomünikasyon alanında bir çalışma yaparak, hizmet süreçlerinde yalın üretim uygulamasının gerçekleştirilebileceğini göstermektedir [19]. Ahlstrom (2004), hizmet şirketlerindeki uygulayıcılara yönelik olarak, yalın üretim için bir çerçeve tanımlamakta ve hizmet sektöründe yalın üretim uygulamalarının tanımlarından oluşan ampirik bir temel kullanarak, yalın yaklaşımı hizmet şirketlerine uyarlamıştır [20].

Bu yönde bazı banka ve finansal kuruluşlar, temel ticari prosedürlerini standartlaştırmak ve israflardan kurtulup müşteri memnuniyetini artırmak için yalın yaklaşım ilkelerini ve metodlarını rutin olarak uygulamaya başlamışlardır [21]. Bank of America, Montreal Bankası, AXA, Banco de Crédito del Perú, BNP Paribas, Capital One, Gwinnett İlçe Hükümeti, Eureko, HSBC Holdings ve HSBC Securities'in Finansal Hizmetler Departmanı, Dubai Royal Bank of Scotland ve SWIFT gibi bazı uluslararası büyük bankalarda yalın çalışmaların yapıldığı ve

üretkenlik ve kalitede önemli gelişmeler kaydedilmektedir [22].

Goldenbaum-Gaber ve Rizenbach (2015) yalın yaklaşımın bankacılık alanında, nasıl uygulandığını incelemişlerdir [10]. Bu çalışmada, yalın yaklaşımın İsrail'in önde gelen bankalarından biri olan Tefen Israelde başarıyla uygulandığını göstermesi bakımından önem taşır. Araştırmacılar, aşama aşama yalın üretimin uygulanışını bir çerçeve sunarak gerçekleştirmişlerdir. Yine bankacılıkta yalın altı sigma metodolojisinin bir uygulanması Kanadada Uluslararası Scotiabank'ta gerçekleştirilmiştir. Scotiabank Kanada dışındaki 55 ülkenin 43'ünde perakende ve ticari bankacılık faaliyetlerini kapsamaktadır [23]. Bazı Çin bankaları rekabetinin artmasıyla, müşteri odaklı politikalar izlemeye yönelmişlerdir ve daha kaliteli hizmet sağlayarak müşteri memnuniyetini arttırmak amacıyla yalın prensipleri uygulamaya başlamışlardır [24]. Kıran ve Kaplan, yaptıkları çalışmada, Amerika'da bankacılık enstitüsünün yalın altı sigma prensiplerini, müşteri hizmetlerini geliştirmek ve maliyetleri düşürmek amacıyla bireysel bankacılık alanında nasıl uyguladıklarını açıklamaktadırlar. [25].

Literatür taramasından görülebileceği gibi, yapılan bazı çalışmalar yanında bankacılık alanında yalın uygulamalarının yeterli düzeyde olduğunun söylenmesi zordur. Bu alanda daha çok çalışmanın yapılmasına yönelik bir gereksinim vardır. Bir bankanın orta ölçekli bir şubesinin günde 20 ila 30 çalışanıyla yüzlerce bankacılık faaliyetinin yerine getirildiği gözönüne alındığında, yalın hizmet yönetimi ve yaklaşımı, israfların ortadan kaldırılması, kaynakların etkin kullanımı, müşteri bekleme sürelerinin azaltılması, yüksek bir düzeyde müşteri memnuniyetinin sağlanması ve iş yükünün azaltılması gibi birçok açıdan büyük katkılar sağlayacaktır.

3. YALIN BANKACILIK (LEAN BANKING)

Yalın yaklaşım, süreçleri, hizmetleri ve ürünleri müşterinin bakış açısıyla değerlerindirip iyileştiren bir yönetim yaklaşımıdır. Yalın yaklaşımın doğru bir biçimde uygulanması, organizasyona uzun vadeli sürekli iyileştirme yeteneği kazandırır. Müşteri için değer ifade eden ürünlere ve hizmetlere yoğunlaşarak; kârlılık en üst düzeye getirilmekte ve süreçteki israflar ortadan kaldırılarak maliyetler en aza

indirgenmektedir. Süreçleri standartlaştırma, verimliliği artırma, kaliteyi yükseltme maliyetleri düşürme gibi konulara odaklanan yalın yaklaşım, şimdiye kadar değişik endüstrilerde başarıyla uygulanmaktadır.

Yalın yaklaşım öncelikle bir iş yapma kültürü ve felsefesidir. Yalın bir kuruluş, müşterileri önem sırasında en üste koyduktan sonra, kar kendiliğinden gelir anlayışını benimser. Müşteriler bir firmanın uzun dönemli hayat sigortası olarak görülür. Yine yalın bir kuruluşta en değerli kaynak, kurumun çalışanlarıdır; çalışanlar yaklaşımın merkezinde yer alır; yani çalışanlar firmanın can damarlarıdır. Yalın bir kuruluşta sürekli iyileştirme olmadan yalın yaklaşım yürüyemez; bu yönüyle kaizen yalın üretimin yaşam tarzıdır. Öte yandan işin yapıldığı yere odaklanma önemlidir; değişiklikleri masa başında yapmak yerine, işin yapıldığı yere gidip, ne olup bittiğini görerek değişiklikleri orada yapmak önemlidir. İsrafın ortadan kaldırılması ise yalın üretimin temel felsefesidir.

İdeal yalın bir banka, istenen hizmetin istenen zaman eksiksiz biçimde gerçekleştirebilen bir bankadır. Değer ve kalite terimleri, bu felsefede müşteri bakışı ile tanımlanır ve “Bir sonraki proses müşterimizdir” ilkesi benimsenir. Bununla beraber, takım çalışması ve insana saygı oldukça önemlidir. Böyle bir ortamda düşük ücretler, çekici teklifler, hızlı ve mükemmel hizmet temelinde, rekabet yaşanmaktadır. Önceki yapılan bankacılık çalışmalarında, yalın yaklaşım, genellikle arka ofis operasyonlarına odaklanırken, devamında yapılan çalışmalar, süreçleri standartlaştırarak ve ön ofis çalışanlarını sürekli eğitim ve yalın kültürle güçlendirerek ön ofislerde de başarılı sonuçların elde edilebileceğini göstermektedir. Bankaların hem ön, hemde arka ofislerindeki operasyonel süreçler, yalın düşünceyle daha verimli hale gelecek ve satış ve müşteri hizmetleri personelin sürekli eğitimiyle geliştirilecek, müşterilere sunulan hizmet artacak ve müşterilerin sadakatini olumlu yönde etkileyecektir. Dolayısıyla gelir ve kazançlar artmış olacaktır.

Yalın bankacılık, yalın düşünceyi esas almaktadır. Bu düşünce ile sistemin süreçlerinin yalınlaştırılması gerçekleştirilmektedir. Yalın bankacılıkta değer, müşterinin en kısa süre ve en uygun biçimde hizmet alması, doğru zamanda doğru işin yapılması anlamına gelmektedir. Yalın düşünce ile bankacılık hizmetlerinde değer katan

ve değer katmayan faaliyetlerin tanımlanarak devamında değer katmayan faaliyetlerin önüne geçilmesi ile sistem işleyişinin optimal düzeyde çalışması sağlanmaktadır. Yalın bankacılıkta değer katmayan faaliyetler belirlenerek minimum düzeye indirilmesi istenmektedir. Değer katmayan faaliyetler denildiğinde göze çarpan ilk faaliyet, bekleme süreleridir. Bekleme süreleri müşterilerin temel şikâyetleri arasında yer almaktadır. Müşterilerin zamanında bankada olmasına karşın bir önceki müşteriden dolayı çok fazla beklemektedir. Özellikle kamu bankalarında maaşların yatırıldığı, ödemelerin yapıldığı dönemlerde bekleme süreleri can sıkıcı hal almaktadır. Oluşan bu problem müşterilerin memnuniyetsiz olmasına neden olmaktadır. Yapılması gereken mevzuatların bir başka kişiye devredilmesi ve bu sürede tekrar beklenilmesi de müşteri memnuniyetsizlikleri arasında yer alabilir. Müşterilerin memnuniyetsiz olması müşteri kaybına neden olmaktadır. Yalın bankacılık istenilmeyen bekleme sürelerini sistemden kurtararak israfı önlemektedir. İsrafın önlenmesi ile hizmet kalitesinin artması, müşteri memnuniyetinin artması ve tatmin gücünü sağlanmaktadır

4. BANKACILIKTA YAŞANAN ZORLUKLAR VE YALIN YAKLAŞIMLA SAĞLANAN ÇÖZÜMLER (CHALLENGES EXPERIENCED IN BANKING AND SOLUTIONS PROVIDED WITH THE LEAN APPROACH)

4.1. Bankacılıkta İsraf (Wastes in Banking)

Yalın üretim felsefesi, israflardan kurtularak işlerin daha kısa sürede tamamlanması amacıyla son yıllarda hizmet sektöründe de uygulanmaya başlamıştır. Yalın felsefe, ürün veya hizmete değer katmayan herşeyi israf olarak görür ve tüm süreçlerden israfları yok etmeye çalışır. Bir ürünün taşınması, stokta tutulması, depolanması, sayılması ve denetlenmesi, bu ürüne değer katmayan aktivitelerdir. Bir kuruluşta yalın üretim sistemine geçmenin ilk adımı, ürüne değer katan ve değer katmayan işlerin oluşturduğu değer akışının analizidir. Ardından, değer akışındaki katma değer sağlamayan faaliyetler ortadan kaldırılmalıdır [19]. Diğer uygulamalarda olduğu gibi bankacılık için de her bir israf türü ayrıntılı olarak belirlenmelidir. Tablo 1’de bankacılıkta

karşılaşılabilecek israf türleri ve bunlarla ilgili örnekler görülmektedir.

Tablo 1. Bankacılıkta israf türleri ve örnekleri(Wasting types and examples in banking)

İsraf Türü	İsraf Örnekler
Bekleme	-İnsanların ihtiyaç duydukları bilgi, hizmet veya kararları beklemesi ya da hazırlanmış bilgi veya kararların ihtiyaç sahiplerine verilmek üzere beklemesi. -Müşteri ilişkileri yöneticisinin, gerçek zamanlı olarak yapılabilmesine rağmen kredi derecelendirme onayını beklemesi.
Hatalar ve Yeniden İşleme	-Yanlış girilen bilgiler nedeniyle bir sözleşmenin yeniden yazılması -Hizmetlerin yanlış fiyatlandırılması. -İşlerin yeniden yapılması, yazıların yeniden yazılması, verilerin yeniden girilmesi.
Aşırı Bilgi üretimi	-Kimsenin istemediği bilgilerin oluşturulması ve hazırlanması. -Bir sonraki süreçte ihtiyaç duyulandan daha fazla çıktı üretilmesi.
İnsanların Gereksiz Hareketi	-İnsanlar ihtiyaç duydukları hizmete ve bilgiye erişmek için gereksiz hareketlerde bulunması veya bu bilgilere erişmek zorunda bırakılmaları. -Süreçlerin yetersizliklerini telafi etmek için sisteme elle müdahale etmek zorunda kalma.
Bilginin Gereksiz Hareketi	-Birimler arasında aşırı bilgi dağıtımı. -Şubelerden arka ofise veya arka ofisten ön ofise gönderilen belgelerinin kopyaları. -Bir sözleşme sayfalarını bulmak için çalışanların yığın halindeki çıktıları elle araması.
Bilginin Aşırı İşlenmesi	-Gerekenden fazla ayrıntılandırmaların yapılması. -Sözleşmelerin, 3 sayfalık bir alternatifi mümkün olduğu halde, 30 sayfalık olması. -Gayrimenkul değerlemesini yalnızca bir kez değil de birkaç kez kontrol etme. -Tek parça akışının sağlanamaması, işlerin biriktirilerek partiler halinde yapılması.
Bilginin Saklanması	-İhtiyaç duyulandan daha fazla bilginin gereksiz yere uzun süre elde tutulması. -Ofislerde veya veri tabanlarında 5S çalışmalarının yapılmamış olması. -Geri ödeme aralıklarındaki değişikliklerden sonra işlenmeyi bekleyen müşteri dosyaları.
Çalışanların yeteneklerinden yeteri kadar yararlanma	-Yaratıcı ve hevesli çalışanları ve ekip üyelerini pasif ve sinir bozucu işlerde görevlendirilerek onları robotlaştırma, yeteneklerinden ve heyecanlarından yeteri kadar yararlanılmaması. -Sözleşmelerinin basılı kopyalarını ofisten büroya taşımak için lisansüstü düzeyde yeterince eğitilmiş çalışanları kullanmak.

Tablo 1’de görüldüğü üzere örneğin bankacılıkta bekleme ile ilgili israflarda, insanlar gereksinim duydukları hizmet, bilgi veya kararları bekliyor olabilirler ya da hazırlanmış bilgiler veya kararlar verilmek üzere ihtiyaç sahiplerine ulaştırılmayı bekliyor olabilir. Bu durum belirlendikten sonra, bekleme israfının nasıl yok edilebileceği de önemli bir sorundur. Bekleme ile ilgili israfının ne olduğu belirlenirse, bu israfın nasıl yok edileceği de kolayca belirlenebilir. Bu kapsamda düzeltici adımlardan bazıları; işlerin yeniden koordine edilmesi, prosedürlerin iyileştirilmesi, sonuçların (bir dosya, vaka, e-posta vb.) hemen bir sonraki ilgili kişiye yani iç müşteriye hiç bekletilmeden iletilmesi, akışın sağlanması yani akışın önündeki engellerin kaldırılması gibi aktivitelerdir. Tablodaki diğer israf türleri de bu yaklaşımla ele alınıp analiz edilebilir.

4.2. Yalın Yaklaşım İlkeleri (Lean Approach Principles)

Yalın yaklaşım metodolojisi beş temel ilkeye dayanmaktadır; 1) Müşterinin gözüyle değer belirlenmesi, 2) Değer Akışının Tanımlanması ve israfları ortadan kaldırılması, 3) Akışın önündeki engellerin kaldırılıp akışın sağlanması, 4) Çekme sisteminin uygulanması 5) Mükemmelle ulaşmak için sürekli iyileşme. Ancak bunlar üretim süreçlerini yalınlaştırmaya ilişkin imalat kitaplarında yazılmış prensiplerdir. Bu ilkeler imalat ortamına göre belirlendiği için bunlar hizmet sektöründe de her zaman bu kadar basit değildir ve tam olarak aynı şekilde karşılık bulamamaktadır. Diğer taraftan hizmet işletmeleri genelinde operasyonların performansını değerlendirmek ve çalışanları yetkilendirip güçlendirmede yalın kavram ve araçların ne ölçüde kullanıldığı henüz belli değildir.

5. HİZMET SEKTÖRÜ İLE ÜRETİM SEKTÖRÜNDE YALIN UYGULAMALARININ FARKLARI (DIFFERENCES IN LEAN APPLICATIONS IN SERVICE AND PRODUCTION SECTOR)

Hizmet sektörü için yalın yaklaşım, üretim sektöründen oldukça farklılık arz etmektedir. Bankacılık alanında başarılı bir yalın yaklaşımın beklenen sonucu vermesi için yalın uygulamaların bankacılık işlemlerinin yapısına göre tasarlanması gerekir. Üretim ortamındaki deneyimi doğrudan

hizmet endüstrisine uyarlamak yetersiz kalmaktadır. Üretim ortamı için hazırlanmış araç ve teknikleri doğrudan hizmet sektöründe kullanmaya kalkışmak kavram karışıklığına neden olmaktadır. Bu yönüyle yalın bankacılık, yalın üretim uzmanlarının hiç düşünmediği başka unsurları da gerektirir. Takip eden kısımda bu konuyla ilgili bazı önemli kavramlar ele alınacaktır.

5.1. Tek Parça Akışı (Single Piece Flow)

Tek parça akış yaklaşımı hizmet sektöründe üretimden farklıdır [20]. Şöyleki bir bankacılık örneğini ele alalım; Bir müşteri bir banka şubesine varır, içeri girer, bir çalışan tarafından karşılanır ve duruma göre belki önce bir çay teklifi yapılır. Ardından gelen müşteri kredi almak için ya da başka bir talep için konuyu çalışana açıklar ve banka çalışanı, gelen müşterinin ihtiyaçlarını daha net anlamak için bazı sorular sorar. Bu arada bankanın bilgisayar sistemlerine birtakım veriler girilir. Bu veriler, kredi talebini onaylamak için bir başka merci tarafından değerlendirilir, şartlar uygun ise belli bir süre sonra müşteri krediyi alır, ya da talebi her ne ise o talebi gerçekleştirilmiş olur. Çok genel olarak bakıldığında, bu durum yalın bir süreç gibi görünüyor. Yani süreçte bir akış var, işler biriktirilerek partiler halinde işlem yapılmıyor. Yani çekme sistemi var gibi gözüküyor, müşteri talep ettiği zaman hizmet gerçekleşiyor. Yani çekme sistemi uygulanıyor. Diğer ifadeyle önceden hazırlanmış hizmetler yok. Kimse bankaya girmediği ya da bir talepte bulunmadığı sürece bir işlem yapılmıyor ya da ona bir tavsiye ya da kredi verilmiyor. Diğer ifadeyle üretim alanında olduğu gibi önceden hazırlanmış stokta bekleyen hizmetler yok. Fakat süreç yalın mı? Burası tartışa götürebilir. Sistem görünüşte yalınmış gibi görünse de aslında, çoğu durumda yalın üretim düşüncesi göz önüne alındığında bankalardaki süreçler yalından çok uzaktır; bilgilerin çoğunlukla sisteme tekrar tekrar birkaç sefer girildiği görülür. Sistemlerde birbirinden bağımsız gereksiz birçok veri giriş noktası vardır. Kararla ilgili olmayan gereksiz birçok ara merci vardır. Bunlar hem süreci uzatmakta, hem de israf oluşturmaktadır. Sonuç olarak sistem yalın değildir. İsrâfların bulunması göreceli olarak kolaydır; ancak bilgi teknolojisi odaklı bir süreçte israflardan kurtulmak zorlaşır. Önemli olan yalın düşüncüyü bilgi teknolojilerinin tasarımında temel bir yapı taşı haline getirmektir.

5.2. Hizmet Sektöründe İş Süreçlerinin Yapısı (Structure of Business Processes in Service Sector)

Bankacılık ve finansal hizmetlerdeki zorluklardan bir diğeri ise, süreçlerin bir üretim hattındaki gibi kolayca görülememesidir. Hizmet süreçleri; iş akış sistemlerinde, telefon görüşmelerinde ve e-postalarda gizlidirler. Bu süreçleri ve süreçlerdeki israfları üretim ortamında olduğu gibi akış doğrusal olarak izlemek zordur. İşin bütünü yapan insanlar daha önceden birbiriyle hiç konuşmamış olabilmekte ve işler telefonla yürütülmektedir.

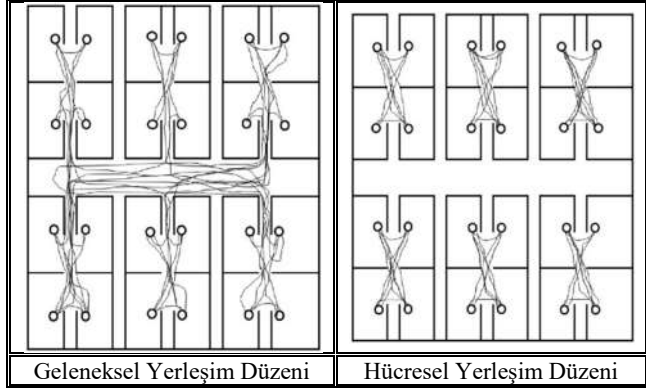
5.3. Hata Önleme (Poke Yoke)

Hizmet sektöründe belgelerin doldurulup hazırlanmasında hatalar ve bunları yeniden düzeltilmesi ise sıkça yaşanmaktadır. Müşterilerin düzenli olarak çeşitli talep formlarını, kredi başvurularını veya diğer belgeleri doldurmaları gerekir. Ancak, bu belgelerde çoğunlukla eksiklikler oluşur ya da formlar yanlış doldurulur. Bu durum, yalın düşünce için büyük bir sorun oluşturur. Bu durum, örneğin müşterinin güncel yeni adresini vermediği bir durum için de geçerlidir. Uygulamalar istenen şekilde sonuçlanmadığı için israflar üretilir ve satış hacmi azalır ve eksiklikleri ve boşlukları doldurmak veya hataları düzeltmek için ek kaynaklar harcanmak zorunda kalınır. Poke Yoke'ye dayalı basit çözümler kullanarak sürecin hata oluşturmayacak şekilde tasarlanması önemli bir yalın çözüm yaklaşımıdır. Birçok durumda, gereksinimleri basitleştirmek başarının anahtarıdır. Müşteriden ne kadar az ve sade bilgi istenirse, müşterinin bir hata yapması veya bir şeyi unutması veya kendi hatalarından ötürü hayal kırıklığı yaratma şansı o kadar azdır.

5.4. Yalın Üretim/Hizmet Kültürü (Lean Production/ Service Culture)

Yalın düşünce, genellikle süreçleri iyileştirmek için bir yöntem olarak algılanır ve uygulanır, çoğunlukla yalın yaklaşımın kültürel yönleri gözardı edilir. Yalın kültürün özü, her çalışanın her seviyede günlük çalışma ortamını ve yöntemlerini geliştirmeye çalışmasıdır. Çoğu zaman, bir proje ekibi belli bir hedefe ulaşmak için planlı bir proje geliştirir. Proje sona erdiğinde, iyileştirme girişimleri de biter. İyileştirmelerin sürekliliği için yalın yaklaşımı bir iş kültürü olarak kuruma yerleştirmek önem arzeder. İletişim,

değişim yönetimindeki en önemli adımdır. Bir bankanın, yalın düşüncenin sunacağı ortak hedef ve beklentileri tüm çalışanlarıyla paylaşması gerekiyor. Yalın kültürü sürdürmek için öğretme ve koçluk önemli yer tutar. "İç müşteri" kavramı, müşterilere yönelik olmayan diğer bölümler için de kullanılmalıdır. Bu yaklaşım, bankanın her yerinde müşteri odaklı bir tutum oluşturur.



Şekil 1. Bankacılıkta geleneksel ve hücreli yerleşim düzeni spaghetti diyagramı (Spaghetti diagram of traditional and cellular settlement in banking)

Böyle bir çözüm sisteme esneklik kazandırır. Talep yüksek olduğunda bir hücredeki çalışan sayısı artırılır, talebin düşük olduğu durumlarda ise başka işlere sevk edilebilir. Bu görevi yapacak yine bir uzman takım oluşturulmalıdır. Uzman ekipler; talep dalgalanmalarına karşı esnekliği ve hücreli yerleşim düzeninde belirlenmiş ekiplerin kapasitesini düzenleyip dengelenmesine yardımcı olurlar. Böylece verimlilik sabitlenir ve standartlar geliştirilir. Açıkça tanımlanmış bir görev veya durum kapsamını yöneten ve böylece iş yükünü dengeleyen özel görevli ekipler kurularak ve daha sonra ortaya çıkan işlerin, görevlerin veya durumların hücreli mantıkla çalışan takımlara dağılmasıyla iş yönetimi basitleştirilir. Takımlarda çalışanların sayısı, tam zamanlı, yarı zamanlı ve geçici sözleşmelerin bir karışımı kullanılarak yapılabilir. Hücreli düzenlemede Görsel Performans Yönetimi önemli kolaylık sağlar. Çalışanların sorunları kolayca tespit etmelerine ve kök nedenleri çabucak ortadan kaldırmaya yönelik çözüm bulmalarına yardımcı olan görsellik oluşturur. Görsellik, sürekli iyileştirme sürecinin başlatılması ve sürdürülmesindeki ilk ve en önemli adımdır. Günlük, haftalık ve aylık performansların izlenebilmesi, yönetici ile ekibi arasında görüşülmesi ve gerekli önlemlerin alınması için, günlük performans göstergeleri olan dosya işleme hızları, her çalışanın üretkenliği vb. görsel bildirim panoları her takım alanına yerleştirilir. Oysaki

geleneksel bankacılık hizmetlerinde sadece kuyruktaki sıra numarası görsel bir panoda sunulmaktadır. Bankada gerçekleşen olaylar (müşterinin bankaya hangi zaman diliminde geldiği, hizmet alabilmek için ne kadar beklediği, en uzun süre bekleyen müşterinin bekleme süresi, müşterinin hangi gişeden ne kadar süre hizmet aldığı, bir müşteriye ait ortalama hizmet süresi, müşterinin hangi zaman diliminde gişeyi terk ettiği) sırasıyla panolara yazdırılabilmektedir.

5.5. Bankacılıkta 6S Yöntemi (Bankacılıkta 6S Yöntemi)

Bankanın arka taraftaki ofislerinde müşteri taleplerinin karşılanmaması durumu başka bir zorluktur. Bu durumda 6S gibi yaklaşımlar iş yeri tertip ve düzenini sağlamada önemli katkı sağlarlar. 6S, Görsel yönetim sisteminin temelini oluşturan önemli bir tekniktir.

6S, 6 adımdan oluşur; Tertip-Düzen-Temizlik-Standartlaştırma-Süreklilik-Güvenlik.

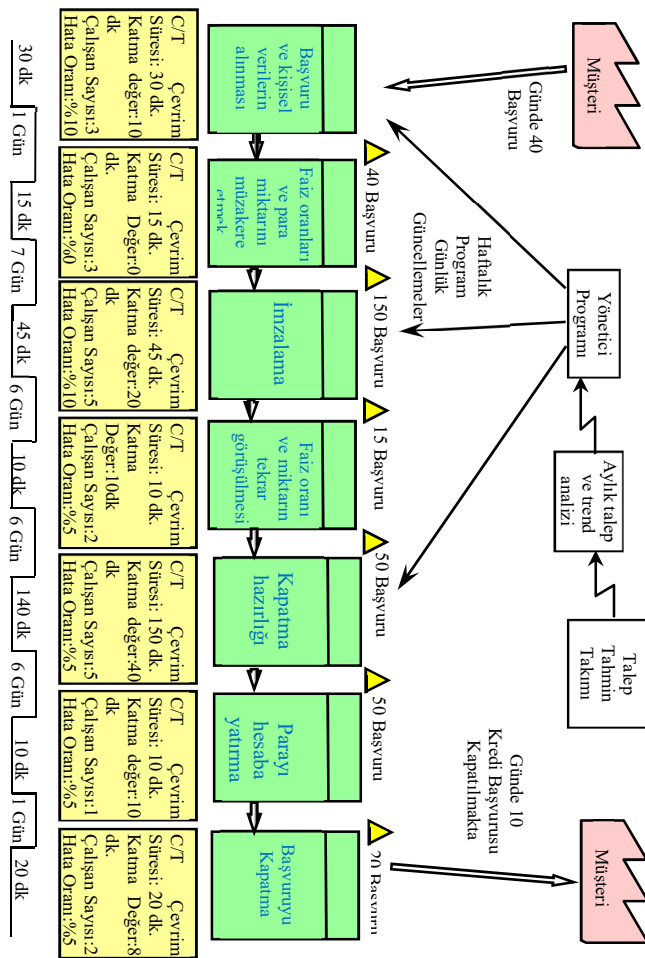
Bankacılıkta 6S hizmet alanında şu konuları kapsamaktadır; Bilgisayar dosya ve belgelerini saklamak için mükemmel bir sistemdir. Masaüstleri her zaman temiz ve düzenlidir. Karışıklık yok, eski formlar ve gereksiz unsurlar yok. Her belgenin bir numarası, kimliği ve zaman bilgisi olmalıdır. Belgeler arşivlerde mükemmel bir şekilde organize edilmektedir. Çevrimiçi bankacılık için 24 saat emniyet, gizlilik ve güvenlik için olağanüstü kurallar geliştirilmiştir. Müşteri adlarının, hesapların, servet bilgilerinin ve işlemlerinin gizliliği önemlidir. Saldırı, soygun, terör saldırısı, yangın, radyasyon, sel, patlama, deprem, kasırga, su ve kimyasal hasardan banka alanlarının, bilgisayarların, ekipmanların ve ofislerin fiziki emniyet ve güvenliği iyi sağlanmıştır. Elektronik verilerin emniyet ve güvenliği, para ve diğer menkul kıymetlerin güvenli ve emniyetli nakli, kasanın emniyet güvenliği, veri yedeklemelerinin güvenliği ve bakımı etkin bir şekilde gerçekleştirilmektedir.

5.6. Değer Akışı Haritası ve Değer Akış Analizi (Value Stream Map and Value Flow Analysis)

Değer Akış Analizi; değer akışı içerisinde kaliteli süreçler elde etmeyi sağlamak amacıyla israfi ve gecikmeleri en aza indirmeyi sağlayan faaliyetleri yönetmektedir. Değer Akış Haritası, değer akış analizinde kullanılan bir araçtır. Değer akış analizi bir sürecin aktivitelerinin performansı hakkında

elde edilen bilgi sayesinde bir sürecin tüm performansının tahmin edilmesini sağlar. Değer Akışı Haritası bir hizmet sürecinin başından sonuna kadar tüm süreçleri haritalamak ve bunları birbiriyle ilişkilendirmek için çeşitli performans ölçütlerini kullanır. Örneğin bir kredi başvurusu yapıp, onaylanarak sonlandırılmasına kadar geçen süreyi göz önüne aldığımızda; "bir kredi başvurusunun tamamlanıp diğer bir kredi başvurusunun başlamasına kadar banka içerisinde geçen tüm süreyi ifade eden akış süresi" ve "her bir işin tamamlanmasını ifade eden çevrim süresi" hizmet performansını değerlendirmek için kullanılan güçlü ölçütlerdir. Bu ölçütler, ilgili süreçlerin baştan sona performansını değerlendirmek için süreç sahibi tarafından en iyi performans göstergeleri olarak kullanılırlar. Ancak bu ölçütler, çalışanların süreçteki rollerini ve sürekli gelişimde nasıl rol oynayacaklarının anlaşılması bakımından süreç çalışanlarının görmeleri sağlanmalıdır.

Kredi başvurusu için hazırlanmış olan Mevcut



Durum Değer Akış Hartası Şekil 2’de görülmektedir. Bir kredi talabinden başlayıp yapılan tüm faaliyetler, harita üzerinde kutularla

belirtilmektedir. Faaliyet (işlem) kutularının altında her bir işlemle ilgili işlem süresi, çalışan sayısı, mesafe, hata oranı gibi bilgiler yerleştirilmiştir. Haritanın en altında zaman çizgisi ile katma değerli işler ve katma değerli olmayan işlerin tamamı belirlenmiştir. Buna göre bir kredi başvurusunun sonuçlanması yani akış süresi 27. 6 gün sürmektedir. Değer katan işlem süreleri toplamı ise 270 dakika ya da 4.5 saat yani yarım gündür. Mevcut durum haritasından ortaya çıkan eğer biz katma değerli işler kadar zaman ve kaynak harcarsak sonuç bu işin yarım günde yapılabileceğidir. Diğer taraftan değer akış analizi süreçteki kaynak kullanım seviyesini hesaba katmaz. Oysa bekleme süreleri kaynak kullanımına direk olarak bağlıdır. Kaynaklar daha meşgul olduğunda, bekleme süreleri de uzar. Örneğin M/M/1 gibi temel kuyruk teorisi modelleri kaynakların sayısı ve işlem süresi gibi her aktiviteye ait verilen detay sayesinde bekleme sürelerinin hesaplanmasını sağlar. Ancak uygulamada daha detaylı analizler için süreç simülasyonu kullanmak yararlıdır [26]. Süreç simülasyonu sürece dâhil olan aktivitelerin işlem zamanı ve kaynakları gibi veriler sayesinde süreç performans ölçütlerinin elde edilmesini sağlar. Bu yönüyle süreç simülasyonu süreç modelleme ve

Şekil 2. Kredi başvurusu sürecinin mevcut durum değer akış haritası (Current status value flow chart of loan application period)

analiz araçları alanında destek veren çok yönlü bir tekniktir.

Çevrim süresi: Bir proste üretilen ardışık iki hizmet arasında geçen süredir.

Akış Süresi: Bir ürün ya da hizmetin değer akışında başlangıçtan bitişe hareketi boyunca geçen süredir.

5.7. Takt Zamanı (Takt Time)

Takt zamanı yalın üretimin temelidir. Takt zamanı, müşterinin bitmiş ürünü istediği tempodur. Üretim ya da hizmet için öngörülen toplam kullanılabilir zamanınızın müşteri talebinize oranı, birim ürün ve/veya hizmetin karşılama hızını verir. Eğer banka içerisindeki işlemler takt zamanından daha uzun sürerse sistem de beklemler artacaktır. Eğer banka içerisindeki işlemler yani çevrim süresi takt zamanından daha kısa olursa banka kaynakları boş kalacaktır. Kaynakların kullanım oranları düşecektir. Takt zamanından fazla olan işlemler, müşteri talebine cevap vermeme durumunu doğuracağından dolayı işlemlerdeki israfı belirlemeli ve buna göre hedef oluşturulmalıdır.

Takt zamanı bu yönüyle çok önemli bir yalın üretim göstergesi ve yalının üretim standardıdır. Buna göre işlemler düzenlenmelidir. Günde 8 saat çalışan ve 1 saat çay ve yemek molaları olan bir bankadaki kullanılabilir toplam zaman (8-1) saat * 25 gün'den 175 saat veya 175*60'dkdan 10500 dakikadır. Eğer aylık müşteri talebi 3500 olarak gerçekleşiyorsa; bu işletmenin müşteri talebini karşılayacak şekilde bir hizmeti yerine getirmek için 3 dakikası (10500 dk / 3500 adet = 3 dk/adet) vardır. 3 dakikadan daha geç sürede işlem yapmak müşteri talebini karşılayamamak; daha kısa sürede işlem yapmak ise kaynakların boş kalması demektir.

Takt zamanı ilkesinin uygulanması ile tüm başvuru süreci boyunca iş yükü düzelir. Bankanın istikrarlı bir iş akışı oluşturması ve sürdürmesi ve darboğazları belirlemesine olanak tanır. Bir "kredi alma hattı" işlemi üç aşamalı olarak düzenlenmiş olsun; uygulama açma, uygulama işleme ve kredi kontrolü. Birinci ve ikinci aşama tüm kredi başvuruları için gerekli, üçüncü aşama ise başvurularının sadece %50'sinde gerekli olmaktadır. Her aşamanın her bir aşaması farklı bir süre aldığı için "kredi alma hattını" dengeli tutmak için her aşamada kaç çalışan gerektiği hesaplanmalı ve dolayısıyla kredi alma uygulamasının akışı sağlanmalıdır.

Ön ofisler de eğer iş dengesi iyi yapılmışsa beklemeler yaşanmayacaktır. Ancak buralarda da kaynakların boş kalması sorunu baş gösterecektir. Genellikle, personel için boşta kalma süresi, hizmetler ve işlemlerde israf kaynaklarının önemli bir alanıdır. Burada hem müşterinin geri çevrilmemesi hem de kaynakların boş kalmaması için çevrim sürelerinin belirlenen takt zamanına göre iyi düzenlenmesi gerekir. Dengeli üş yükünün (Heijunka) düzenlenmesi önemlidir. Çevrim sürelerinin belirlenmesinde ise yalın üretimin en temel bir standardı olan takt zamanı iyi belirlenmelidir. Takt zamanına göre hizmet verildiğinde, yalın bir iş sistemi gerçekleşmiş olacaktır. Daha iyi bir kapasite yönetimi için yük dengelemesi (Heijunka) gerekir. Böylece aşırı yüklerin ve boşta kalmanın önüne geçilir.

6. BANKALARDA YALIN DÖNÜŞÜM İÇİN BENZETİM ÇALIŞMASI (SIMULATION STUDY FOR LEAN TRANSFORMATION IN BANKS)

6.1. Simülasyon Modelinin Gerekliği (The Necessity of Simulation Model)

Dinamik veya rasgele etkilere maruz kalan karmaşık problemleri, doğrudan yalın yaklaşımı kullanarak analiz etmek zor ve masraflı olabilir. Bu doğrultuda sorunların çözülmesi için geniş kapsamlı bir deney yapmak gerekebilir. Böyle durumlarda, benzetim yöntemi, bankalarda yalın yaklaşımın etkilerini analiz etmede destek ve katkı sağlayabilir [22] [27] [28]. Simülasyon, yapı veya içerikteki değişikliklere nasıl tepki vereceğini görmek için gerçek dünya sistemlerinin modelleri üzerinde deney yapma imkânı sağlar. Gerçek bir üretim ortamında deney tasarımıyla, üretim sürecini potansiyel olarak etkileyebilecek çeşitli faktörleri belirledikten sonra, bu faktörlerin en iyi durumdaki ideal değerleri, en kötü değerleri ve çeşitli senaryolar düşünülerek denemeler yapılabilir. Örneğin, ampul üreten bir tesiste deney tasarımı ile doğrudan üretim ortamında 100 partilik bir ampul, 70 derece sıcaklıkta üretilirken, diğer bir 100 partilik ampul ise 95 derece sıcaklıkta üretilerek oluşacak verim farkı araştırılıp analiz edilebilir. Bu yaklaşım, çalışma sıcaklığının kalite üzerindeki önemi ya da hatalı üretilen ampullerin maliyeti hakkında bir fikir verebilir. Bununla birlikte, bankacılıkta benzer bir deneyi gerçek bir bankada gerçekleştirmek maliyetli olabilir ve önemli sayıda müşteri kaybı yaşanabilir. Böyle bir durum karşısında bir banka şubesinin benzetim modeli oluşturularak, model üzerinde gerçekleştirilecek benzetimle takt zamanına en uygun olacak bir çevrim süresinde nasıl hizmet verilebilir, akış süresi ne olur, müşterilerin kuyrukta ne kadar bekleyeceği, bir müşterinin hizmeti tamamlanıncaya kadar sistemde geçireceği süre, belli bir zamanda ne kadar müşteriye hizmet verileceği, kapasite kullanım oranları gibi değişik koşullardaki banka şubesinin davranışları hakkında bilgi edinebiliriz. Böylece benzetim modelleri, bankanın günlük işlemlerini kapsayan birçok faaliyetleri analiz etmede kullanılabilir. Bu çerçevede ödeme işlemleri, kasa işlemleri, kart işlemleri, kredi başvuru işlemleri, yeni hesap açma, ATM işlemleri ve kredi işlemleri gibi aktivitelerin tamamı bir banka şubesi benzetim modeli ile ayrı ayrı senaryolarla ya da bütünsel bir modelle

modellenebilir. Simülasyon, banka yöneticilerinin, şube işlemlerinin farklı zamanlarda rassal olarak müşteri talebine veya hizmet faaliyetine nasıl tepki vereceğini görmeleri açısından önemli katkılar sağlar. Gerçek bir sistemin benzetim modellemesi, If-Then (eğer-olursa) senaryoların etkisini gösterir ve karmaşık değerlendirmeler için ilgililere karar desteği sağlar.

Simülasyon, yalın üretim ilkelerini geliştirmek, onların etkilerini araştırmak amacıyla modellenip kullanılabilir. Bu yönde benzetim, problemlerin yüksek oranda değişkenlik ve karmaşıklık gösterdiği ve gerçek sistem üzerinde standart denemenin maliyetinin çok yüksek olduğu durumlarda oldukça avantaj sağlar. Örneğin, yalın düşüncenin müşteri bekleme sürelerini azaltacağını belirlemek için, banka nakit para verme makinelerinin birçok farklı şubedeki etkisi gözlenip değer akış analizi yapılarak uygulamaya geçmeden öncede benzetim çalışması yapılabilir.

6.2. Bir Banka için Benzetim Çalışması (Simulation Work for a Bank)

Yalın bankacılıkta müşteri memnuniyeti temel alınarak en önemli sorun olan bekleme süreleri benzetim tekniği ve yalın düşünce sisteme birlikte entegre edilerek sistemin değer katmayan bekleme sürelerinden kurtulması sağlanmıştır. Benzetim tekniğinin kullanılmasındaki esas amaç var olan sistemin gelişigüzel gözlenerek değiştirilmesi maliyetlerin artmasına ve zamanın düzgün kullanılmamasına neden olabilmektedir. Var olan sistemin davranışını tahmin ederek yalın düşüncede israf olarak nitelendirilen darboğazın ortaya çıkması amaçlanmıştır.

Benzetim tekniğinin seçilmesindeki esas amaç; kuyruk modelleri, çeşitli varsayımların geçerli olduğu kuyruk sistemlerinin rassal olarak ortaya çıkan talebe hizmet sunarken gösterdikleri davranışları tahmin etmekte kullanılmaktadır. Buna karşılık, benzetim genel amaçlı ve esnek bir teknik olduğundan her sisteme uygulanabilir. Dolayısı ile kuyruk teorisi modellerinin varsayımlarına uygunluk göstermeyen bir sistemi, yanlış varsayımlarla analitik modeller çerçevesine zorlamak yerine, gerçek sistem için bir benzetim modeli geliştirmek en iyi çözüm olacaktır. Ayrıca karmaşık kuyruk sistemlerini analitik olarak modelleştirmenin oldukça güç olması sebebiyle, karmaşık sistemlerde benzetim temel bir yaklaşım olarak görülmektedir [23].

Kamu bankalarından olan bir bankanın şubelerinden biri uygulama için baz alınmıştır. % 74 ü gişe müşterisi, %26 si müşteri hizmetlerinde işlem yaptırmak isteyen 146 müşteri üzerinden uygulama yapılmıştır. Mevcut sistemde iki gişe hizmetlerine bakan personel, dört müşteri hizmetlerine bakan personel görev yapmaktadır. Dokuz müşteri kapasiteli bekleme salonu mevcuttur. Sistemin benzetimi ProModel simülasyon yazılım programı ile yapılmıştır.

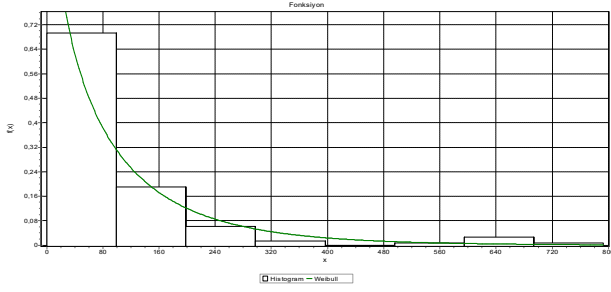
Müşteri gözlemleri belli aralıklarla alınarak gözlem değerleri oluşturulmuştur. Gözlem değerleri (gelişler arası süreler, hizmet süreleri) EasyFit programında Tablo 2’de yer alan uygunluk testlerinin sonuçlarına göre hangi dağılım kullanılacağına karar verilmiştir.

Kolmogorov-Smirnov uygunluk testi ve Ki-Kare uygunluk testi arasında önemli bir farklılık bulunmamaktadır. Kullanımı daha kolay ve ön şartına bağlı kalmayan Kolmogorov- Smirnov testi Ki-Kare uygunluk testi yerine kullanılabilir [24]. Bu yüzden, gözlem değerlerinin dağılımları Kolmogorov-Smirnov uygunluk testine göre belirlenmiştir.

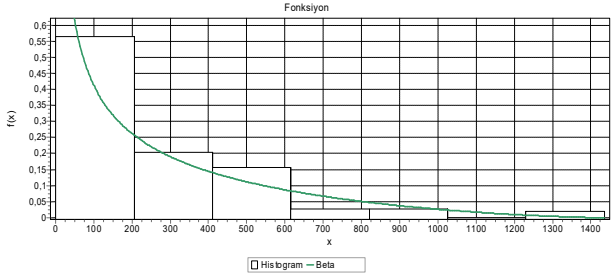
Tablo 2. Uygunluk testine göre dağılımların sıralanması (Rank distributions according to fitness test)

Dağılım	Gelişlerarası süreler		Dağılım	Gişe hizmet süreleri		Dağılım	Müşteri hizmet süreleri	
	İst. Değeri	Sıra		İst. Değeri	Sıra		İst. Değeri	Sıra
Gen. Pareto	0,058	1	Johnson SB	0,097	1	Dagum	3,882	1
Gen. Extreme Value	0,082	2	Gen. Extreme Value	0,102	2	Johnson SB	4,810	2
Weibull	0,084	3	Gen. Pareto	0,102	3	Rice	10,251	3
Gamma	0,084	4	Dagum	0,109	4	Nakagami	10,968	4
Pareto 2	0,090	5	Beta	0,126	5	Normal	14,501	5

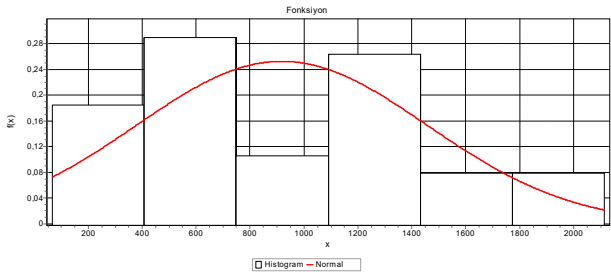
Kolmogorov-Smirnov uygunluk testinden çıkan sonuçlara göre, müşterilerin gelişlerarası süreleri Şekil 3’te grafiği gösterilen Weibull (0.86, 94.31) dağılımına, müşterilerin gişe hizmet süreleri Şekil 4’te grafiği gösterilen Beta (0.51,2.44) dağılımına, müşteri hizmet süreleri Şekil 5’te grafiği gösterilen Normal (539.06, 917.89) dağılıma uygun olduğu saptanmıştır.



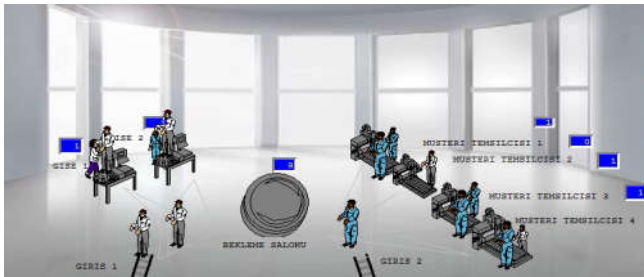
Şekil 3. Müşterilerin gelişlerarası süreleri dağılımı (Time-to-arrival distribution of customers)



Şekil 4. Gişe hizmetlerinin işlem süreleri dağılımı (Transaction time distribution of box office services)



Şekil 5. Müşteri hizmetlerinin işlem süreleri dağılımı (Transaction time distribution of customer service)



Şekil 6. Sistemin benzetimi (Simulation of the system)

Benzetim modellerinde önemli olan aşamalardan biri doğrulama ve geçerlilik aşamasıdır. Doğrulama, benzetim modelinin doğruluğunun test edilmesi ile ilgilidir. Geçerlilik, benzetim modelinin gerçek sistemi doğru şekilde gösterip göstermediğini ifade etmektedir [25].

Modelin doğrulanma sürecinde akış diyagramları, sayaçlar modele eklenerek modelin doğru çalışıp çalışmadığı test edilmesi, girdi parametrelerinin simülasyon sonunda çıktıları alınarak modelin doğrulanması yapılmıştır. Sistemin geçerliliği ise gerçek sistem ile karşılaştırılarak yapılmıştır.

Modelin geçerliliği Denklem 1'deki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$|t_0| = \left| \frac{y_2 - \mu_0}{s\sqrt{n}} \right| \quad (1)$$

y_2 : Ortalama bekleme zamanı, μ_0 : örnek ortalaması, s : standart sapma, n : replikasyon sayısını ifade etmektedir.

Çıktı analizlerine göre, $y_2=3,36$, $\mu_0=3,66$, $n=10$, $s=0,49$ bulunmuştur. Güven aralığı, %95 güven düzeyinde alınmıştır. Denklem 1'deki formüle göre sonuç 2 çıkmıştır. Çıkan sonuç, 2-yönlü ters istatistiği sonucundan (2-yönlü test istatistiği sonucu $t_{9,0,025} = 2,262$) küçük olduğu için sistem geçerliliğini korumaktadır. Denklem 1'de yer alan simülasyon çıktıları test istatistiğinin çıktılarıdır. Simülasyonun replikasyon sayısını belirlemek için Manuel D. Rosetti'nin "Simulation Modeling and Arena" kitabı (sayfa 223-225) referans alınmıştır [29].

Güven aralığı, Denklem 2'den yararlanılarak sistemin güvenilirliği hesaplanmıştır.

$$GA = [x(n) \pm tn - 1,1 - \frac{\alpha}{2} * \sqrt{\frac{s(n)^2}{n}}] \quad (2)$$

Sistemin güven aralığı, $GA= 3,66 \pm 0,89$ şeklinde bulunmuştur. %95 güven düzeyinde gerçek ortalama [2,77,4,55] arasındadır. Replikasyon sayısı 10, gerçek sistemin günlük çalışma süresi ve simülasyonun çalışma süresi 8 saat olarak alınmıştır. Simülasyon modelinin 10 kere çalıştırılması uygun olacağı hesaplanarak karar verilmiştir. Her bir çalışma da elde edilen sürelerin ortalamaları alınarak hizmet süreleri belirlenmiştir. Şekil 6'da gösterilen simülasyon modelinin sonuçları Tablo 3 ve Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Sistemin lokasyon çıktıları (Location output of the system)

Lokasyon İsimleri	Toplam Müşteri Sayısı	Hizmet Süresi (dk)	Kullanım Oranı (%)	Boşta Kalma Oranı (%)
Gişe 1	95	4,54	89,77	10,23
Gişe 2	113	3,60	84,78	15,22
Müşteri Temsilcisi 1	35	13,41	97,78	2,22
Müşteri Temsilcisi 2	32	14,67	97,81	2,19
Müşteri Temsilcisi 3	29	16,12	97,39	2,61

Müşteri Temsilcisi 4	29	15,97	96,47	3,53
Bekleme Salonu	195	21,47	96,89	3,11

Tablo 4. Sistemin müşteri çıktıları (Customer output of the system)

Müşteri Tiplerinin İsimleri	Bekleme Süreleri (dk)	Hizmet Süreleri (dk)	Toplam Kalınan Süre (dk)	Toplam Başarısızlık
Gişe Müşterileri	3,44	9,27	13,57	61
Müşteri Hizmetleri	33,40	24,59	58,50	118

Çıkan sonuçlara göre, gişe hizmetleri toplam 208, müşteri hizmetleri 125 müşteriye hizmet vermektedir. Bekleme salonunda günlük toplam 195 kişi beklemiştir. Bekleme salonunda 21,47 dk. beklenmektedir. Gişe hizmetleri 4,07 dk., müşteri hizmetleri ise 15,04 dk. hizmet vermektedir. Gişe hizmetlerinin kullanımı % 86,27 iken müşteri hizmetlerinin kullanımı % 97,36 dolaylarındadır. Bekleme salonu ise % 97 kullanım oranı ile çalışmaktadır. En yüksek kullanım verimliliği müşteri hizmetlerinde verilmektedir.

Mevcut sisteme en iyi alternatif sonuç en fazla gişe hizmetlerinde katma değeri olmayan bekleme sürelerinin olduğu tespit edilerek katma değeri olmayan bekleme sürelerinin en aza indirmesini sağlayan alternatif çözüm gişe hizmetlerinin yoğunluğunun azaltılması olarak tespit edilmiştir. Önerilen diğer alternatifler, gözlemler sonucunda çalışanların yeterince düzgün ve disiplinli çalışmamasından kaynaklı sorunlar oluşmaktadır. Banka personelinin disiplinli ve düzgün çalışma konusunda eğitimine verilen önemin artırılması, bankanın çalışma performansını ve müşteri tatmini olumlu yönde etkileyeceği düşünülmektedir. Gişe ve müşteri hizmetlerinde oluşan uzun kuyruklardan dolayı müşteriler bekleme salonunda uzun süre beklemektedirler. Müşterilerin bekleme zamanları memnun etmek için; bekleme süresince çalınacak hafif enstrümantal müzik ya da küçük ikramlar sunulması müşteri memnuniyetini arttırarak, müşterilerin bekleme sürelerini daha az algılamasına yarayacaktır [26].

Tablo 5. Alternatif modelin lokasyon çıktıları (Alternative model location outputs)

Lokasyon İsimleri	Toplam Müşteri Sayısı	Hizmet Süresi(dk)	% Kullanım Oranı	% Boşta Kalma Oranı
Gişe 1	108	3,77	84,87	15,13
Gişe 2	105	3,80	83,20	16,80
Gişe 3	123	3,44	88,11	11,89
Müşteri Temsilcisi 1	30	15,55	97,20	2,80

Müşteri Temsilcisi 2	35	13,01	94,90	5,10
Müşteri Temsilcisi 3	29	16,12	97,39	2,61
Bekleme Salonu	369	10,64	89,90	10,1

Tablo 6. Alternatif modelin müşteri çıktıları (Customer output of the alternative model)

Müşteri Tiplerinin İsimleri	Bekleme Süreleri (dk)	Hizmet Süreleri (dk)	Bankada Kalınan Toplam Süre (dk)	Toplam Başarısızlık
Gişe Müşterileri	8,82	6,79	16,08	28
Müşteri Hizmetleri	16,31	18,84	35,63	62

Alternatif modelin çalıştırılması ile gişe hizmetinden 128 kişi daha fazla yararlanmıştır. Bekleme salonunda toplam 195 kişi beklemiştir. Bekleme salonunda bekleme süresi 10,83 dk. azaltılmıştır. Gişe hizmetlerinin kullanımı oranları değişmemiştir. Bekleme salonu kullanım oranı % 50 azaltılmıştır. Müşteri hizmetlerinden yararlanan bir kişi bekleme süresinin yarısı kadar değer katmayan faaliyet azaltılmıştır (Tablo 5 ve Tablo 6).

7. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışma birkaç bakımdan önemlidir. Öncelikle, yalın hizmet yönetimi uygulamaları yeni yeni uygulama alanı bulmaktadır. Bu yönüyle Türkiye'de bankacılık hizmetleri ile ilgili yalın uygulamaların yok denecek kadar az olduğu göz önüne alındığında literatüre önemli bir katkı sağlanmış olmaktadır. Ayrıca yalın yaklaşımın, mevcut verimliliği artırmak için ilave bir girdi kullanılmadan büyük gelişmeler sağlama potansiyelinin gösterilmesi de çalışmanın önemini arttıran unsurlardandır. Elde edilen sonuçlara göre, bankacılık sektörü ve hizmet sektörlerinde katma değeri yüksek iş elemanlarına yoğunlaşarak basit iyileştirmelerle daha verimli sonuçlara ulaşılabileceğini göstermektedir. Diğer bir nokta ise, hizmet sektöründeki yalın uygulamaların, üretim sektöründeki uygulamalardan farklılık göstermesidir. Bu yönüyle yalın hizmet uygulanmasında gözönüne alınabilecek hususların açıklığa kavuşturulmuş olmasında önemli bir katkıdır.

Bu çalışmada ortaya çıkan somut iyileştirme sonuçlarını iki kısımda özetleyebiliriz: Bunlardan ilki yalın yöntem ve prensiplerin hizmet sektörüne uygun olarak bankalarda doğrudan uygulanmasıyla elde edilen sonuçlardır, ikincisi

ise bu çalışmada yapılan benzetim çalışmasıyla elde edilen sonuçlardır. Doğrudan bankacılıkta yapılacak yalın dönüşüm çalışmaları, geleneksel bankacılıkla karşılaştırıldığında büyük iyileştirme sonuçları ortaya çıkarmaktadır. Bankalarda israfların belirlenip sistematik şekilde yok edilmesi, 6S yönteminin uygulanması, değer akış haritasının hazırlanıp değer akış analizinin yapılması, yerleşim düzeninin takım çalışma tarzına uygun olarak yeniden düzenlenmesi, yalın hizmet kültürünün bankalarda hayata geçirilmesi, süreçleri geliştirmek ve optimize etmek için kaizen çalışmalarının aralıksız uygulanmasıyla, hata önleme (Poke yoke) düzeneklerinin iş süreçlerine eklenmesi gibi mevcut bankacılık hizmetleriyle kıyaslandığında çok önemli katkılar sağlamakta ve önemli sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Müşteriden müşteriye “kredi alma hizmeti” için çevrim süresi, veri toplama noktalarının azaltılması, dökümanların karmaşıklığının giderilmesi ve yetkilerin artırılarak gerekli imzaların ve onatların azaltılması yoluyla israfların büyük oranda azaltıldığı, bunun sonucunda da hizmet sürelerinde iyileşmeler yaşandığı görülmüştür. Çalışanların ve müşterilerin sistemde dolaşımını ve genel süresini azaltmak için yüksek düzeyde kendi kendine hizmet verme işlevine sahip çok amaçlı ATM’ler eklenmesi ve uzman ekiplerle yalın hizmetin sunulması müşteri bekleme sürelerini büyük oranda azaltmaktadır. “İlk seferde doğru uygulamaları”, kapsamında ekip ya da kişilerin yetki ve sorumluluklarının artırılmasıyla, ön hattaki satış personelinin arka taraftaki büro personeline gönderilen eksik ya da hatalı dosyaların oranı önemli ölçüde azaltılmış ve böylece kalite düzeyi önemli ölçüde artırılmıştır. Sürece özgü masrafların yani bekleme sürelerinin ortadan kaldırılması ile israflar yok edilmiştir ve böylece çalışanların (müşteri hizmetleri temsilcilerinin) ek müşterileri karşılaması için katma değer yaratılma süresi artırılmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında yapılan benzetim çalışmasıyla elde edilen sonuçlar, genel uygulama sonuçlarını kanıtlar niteliktedir. Banka benzetiminde uygulanan yalın düşünce kavramı ile günümüzde büyük sorun haline gelen bekleme süreleri alternatif sistemde özellikle müşteri temsilcisinden hizmet almak isteyen müşterilerde %50 oranında azaltılmış, aynı şekilde bekleme salonunda bulunan insan sayısında da % 50 oranında azalma görülmüştür. Yani, özellikle bekleme sürelerinden oluşan kayıpların büyük oranda önüne geçilmiştir. Standart iş süreçlerinin

uygulanması, hatalı bilgi girişlerinin ortadan kaldırılması tekrar işlemleri önemli oranda azaltmıştır. Sonuç olarak hücreli yerleşim ve bekleme sürelerinin azaltılması alan kullanımında önemli katkı sağlamıştır. Hizmet sektöründe özellikle de bankacılık alanında gelecekte yapılabilecek çalışmalarla ilgili olarak büyük bir boşluğun olduğu anlaşılmaktadır. Herşeyden önce yalın düşünce salt yalın yöntemleri uygulamaktan ziyade, bir kültürel değişimi gerektirdiği için farklı toplumlarda yalın dönüşüm için gerekli kültürel değişimin nasıl gerçekleştirilebileceği üzerine çalışmalar yapmak önem arz etmektedir.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] C. Duthoit, S. Bartletta ve R. Bhatia, «Lean Banking, A Holistic Approach to Significant and Sustainable Value,» Echnology Dıgital, Financial Services, bcgperspectives, [Online]. Available: <https://www.bcg.com/publications/2010/informatio-technology-financial-institutions-it-advantage-spring-2010-lean-banking.aspx> , 2010.
- [2] İ. Cil ve Y. S. Turkan, «An ANP-based assessment model for lean enterprise transformation,» International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, cilt 64, no. ISSN:0268-3768 ,DOI: 10.1007/s00170-012-4047-x, pp. 1113-1130, 2013.
- [3] E. Pekin ve İ. Çil, «Kauçuk sektörü Poka-Yoke uygulaması,» Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, cilt 19, no. 2, pp. 163-170, 2015.
- [4] S. Conger, «Six sigma and business process management: in Handbook of Business Process,» no. 1, 2010.
- [5] H. Sariaslan, «Sıra Bekleme Sistemlerinde Simulasyon Tekniği,» Ankara: Ankara Üniversitesi Siyasal Bilgiler Fakültesi Yayınları, 1986.
- [6] J. P. Womack ve D. T. Jones, «Yalın Düşünce,» İstanbul:Optimist Yayınları, 2007.
- [7] N. Sayer ve B. Williams, «Lean for Dummies,» Wiley Publishing, Inc., 2007.
- [8] F. Candaş, S. Yalçın ve İ. Çil, «1991-2015 Yılları Arasında Yalın Üretim Alanında Yayınlanmış Makale Çalışmalarının Literatür Taraması ve İçerik Analizi,» Uluslararası Sosyal Araştırmalar Kongresi-

- International Social Research Congress, USAK'2017, 2017.
- [9] I. Cil, N. O.Erdil, T. Kılıç ve B. Kosar, «Lean Logistic Network Design And Analysis With Anylogic,» %1 içinde LM-SCM 2016 XIV. International Logistics And Supply Chain Congress, Izmir, 2015.
- [10] D. Goldenbaum-Gaber ve R. Rizenbach, «Implementing the Lean Approach in a Financial Organization,» Tefen Israel, <http://www.tefen.com/insights/industries/>, 2014.
- [11] B. Rayner, «Trends in Lean Implementations,» Technology Forecasters Inc. www.emsnow.com, 2007.
- [12] M. Smith, S. Paton ve J. MacBryde, «Lean implementation in a service factory: views from the front-line,» *Production Planning & Control*, cilt 29, no. 4, pp. 280-288, 2017.
- [13] S. Islam, «Credit card account opening excellence using six sigma methodology,» *International Journal of Lean Six Sigma*, cilt 7, no. 3, pp. 294-323, 2016.
- [14] D. Stadnicka ve R. C. Ratnayake, «Enhancing performance in service organisations: a case study based on value stream analysis in the telecommunications industry,» *International Journal of Production Research*, cilt 55, no. 23, pp. 6984-6999, 2017.
- [15] W. Hadid, S. A. Mansouri ve D. Gallea, «Is lean service promising? A socio-technical perspective,» *International Journal of Operations & Production Management*, cilt 36, no. 6, pp. 618-642, 2016.
- [16] R. Asnan, N. Nordin ve S. N. Othman, «Managing Change on Lean Implementation in Service Sector,» *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, cilt 211, no. 313 – 319, 2015.
- [17] T. Farrington, J. Antony ve K. D. O’Gorman, «Continuous improvement methodologies and practices in hospitality and tourism,» *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, cilt 30, no. 1, pp. 581-600, 2018.
- [18] Z. Radnor ve P. Walley, «Learning to Walk Before We Try to Run: Adapting Lean for the Public Sector,» *Public Money & Management*, cilt 28, no. 1, pp. 13-20, 2008.
- [19] L. Arbos, «Design of a Rapid Response and High Efficiency Service by Lean Production Principles: Methodology and Evaluation of Variability of Performance,» *International Journal of Production Economics*, cilt 80, no. 2, pp. 169-183, 2002.
- [20] P. Ahlstrom, «Lean Service Operations: Translating Lean Production Principles to Service Operations,» *International Journal of Services Technology and Management*, cilt 5(5/6), pp. 545-564, 2004.
- [21] K. Mayer, «Lean Banking,» www.evolvingexcellence.com/Blog/2008/09/leanbanking.html, 2008.
- [22] B. Oppenheim ve M. Ferbur, «Lean for Banks: Improving Quality, Productivity, and Morale in Financial Offices,» *Productivity Press*, 2014.
- [23] A. Ahmad, «Application of Lean Six Sigma Methodology in Banking,» <http://asqtorontoforum.org/asqtoronto/wp-content/uploads/2014/12/20141127-Application-of-Lean-Six-Sigma-Methodology-Application-in-Banking-FINAL.pdf>, 2014.
- [24] L. Wang ve I. Hussain, «Banking Sector Growth in China: Can Six-Sigma Be a Solution?,» *International Journal of Business and Management*, cilt 6, no. 2, pp. 169-176, 2011.
- [25] A. Kiran ve C. Kaplan, «Applying Six Sigma Principles to Retail Banking,» *US: Lean Banking Institute*, 2013.
- [26] M. Laguna ve J. Marklund, «Business Process Modeling, Simulation and Design,» *Prentice Hall, New York*, 2004.
- [27] I. Cil ve M. Mala., «A multi-agent architecture for modelling and simulation of small military unit combat in asymmetric warfare,» *Expert Systems with Applications*, cilt 37, no. 2, pp. 1331-1343, 2010.
- [28] I. Cil, «Internet-based CDSS for modern manufacturing processes selection and justification,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, cilt 3, no. 177-190, p. 20, 2004.
- [29] M. D. Rossetti, *Simulation modeling and Arena*, John Wiley & Sons, 2015.
- [30] V. Alina-Maria, «Lean Management in Banking,» *Annals Of The University Of Craiova Economic Sciences Year*, cilt XXXXI No. 39., 2011.
- [31] F. Lutz, «Lean Banking: It Is Not Always Just Single-Piece Flow,» <https://www.isixsigma.com/industries/finan>

- cial-services/lean-banking-it-not-always-just-single-piece-flow/, 2015.
- [32] M. Altuntaş ve İ. Çil, «Yalın Üretim Eğitimleri ve Kullanılan Eğitim Araçları,» Uluslararası Sosyal Araştırmalar Kongresi-International Social Research Congress,USAK'2017 Sempozyumu, 20-22 Nisan 2017, İstanbul., 2017b.
- [33] J. Banks ve J. S. Carson, «Discrete- Event System Simulation,» London: Prentice Inc., 1984.
- [34] H. Bircan, Y. Karagöz ve Y. Kasapoğlu, «Ki-Kare ve Kolmogorov Smirnov Uygunluk Testlerinin Simulasyon ile Elde Edilen Veriler Üzerinde Karşılaştırılması,» Cumhuriyet Üniversitesi, İİBF, İşletme Bölümü, cilt 4, no. 1, pp. 69-80, 2003.
- [35] M. Gül, E. Çelik, A. F. Güneri ve A. T. Gümüş, «Simülasyon ile Bütünleşik Çok Kriterli Karar Verme: Bir Hastane Departmanı İçin Senaryo Seçimi Uygulaması,» İstanbul Ticaret Üniversitesi, pp. 1-18, 2012.
- [36] G. Tarkin ve Ü. Akkuş, «Müziğin Tüketim Davranışına Etkileri,» Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi, cilt 32, pp. 303-317, 2009.
- [37] I. Cil ve M. Mala, «A multi-agent architecture for modelling and simulation of small military unit combat in asymmetric warfare,» Expert Systems with Applications , cilt 37, no. 2, pp. 1331-1343, 2010.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 22.03.2018 <u>Kabul/Accepted</u> 21.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.299354	

Bulanık bozulma ve öğrenme etkileri altında tek makine erken/geç tamamlanma probleminin bulanık şans kısıtlı programlama tekniği ile incelenmesi

Oğuzhan Ahmet Arık^{*1} M. Duran Toksarı²

ÖZ

Bu çalışmada tamamıyla bulanık ortamdaki tek makine çizelgeleme probleminde, öğrenme ve bozulma etkileri altındaki işlere ait ağırlıklı erken/geç tamamlanma maliyetlerinin en aza indirilmesi için bulanık karma tamsayı doğrusal olmayan bir matematiksel model sunulmuştur. Çalışma içerisindeki işlem süreleri, öğrenme etkisi ve bozulma etkisi gibi parametreler belirsizlikleri nedeni ile bulanık sayılar olarak modellenmiştir. Öğrenme ve bozulma etkileri çizelgeleme problemlerinde yirmi yıldır oldukça ilgi görmektedirler. Erken/geç tamamlanma problemleri tam zamanında üretim felsefesini benimseyen üretim firmaları için oldukça önemlidir. Tam zamanında üretim yapan bir işletmenin gerçek hayat karmaşıklığını modelleyebilmek için bulanık küme teorisi ve erken/geç tamamlanma problemleri karma tamsayı matematiksel modeller ile kullanılabilir. Bu çalışma içerisinde önerilen bulanık matematiksel modelin net eşleniğinin belirli güven aralıklarında oluşturularak çözülmesi için bulanık şans kısıtlı programlama tekniği kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tek makine, erken ve geç tamamlanma, bulanık parametreler, şans kısıtlı programlama, karma tam sayılı doğrusal olmayan bulanık programlama

Fuzzy chance constrained programming technique for single machine earliness/tardiness scheduling problem under effects of fuzzy learning and deterioration

ABSTRACT

To minimize total weighted earliness/tardiness costs of the jobs under effects of deterioration and learning on a single machine in a fully fuzzy environment, a mixed integer fuzzy non-linear mathematical programming model is presented in this study. Parameters in this study such as processing times, learning effect and deterioration effect are considered as fuzzy numbers because of their uncertainties. Learning and deterioration effects have been considered in scheduling problems for twenty years. Earliness/tardiness scheduling problems are significant for manufactures that adopt themselves in Just-in-Time philosophy. In order to model the real life complexity of Just-in-Time manufactures, earliness/tardiness scheduling problems can be used with mixed integer mathematical programming models. In this study, fuzzy chance

* Corresponding Author

¹ Industrial Engineering Department, Nuh Naci Yazgan University, 38170, Kayseri / Turkey, oaarik@nny.edu.tr

² Industrial Engineering Department, Erciyes University, 38280, Kayseri / Turkey, dtoksari@erciyes.edu.tr

constrained mathematical programming technique is used to find crisp equivalent of the proposed mixed integer fuzzy non-linear mathematical programming model and solve it.

Keywords: Single machine, earliness and tardiness, fuzzy parameters, chance constrained programming, fuzzy mixed integer nonlinear programming

1. GİRİŞ VE LİTERATÜR İNCELEMESİ (INTRODUCTION AND LITERATURE REVIEW)

Bu çalışmada tek makine çizelgeleme problemleri bulanık işlem süreleri kullanılarak, bulanık öğrenme ve bozulma etkileri altında toplam ağırlıklı erken / geç (E/G) tamamlanma sürelerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde model parametrelerini belirgin olarak kullanan bir çok çalışmaya rastlanabilmektedir. Biskup [1] makine çizelgeleme problemlerinde, öğrenme etkisini ortaya koyan ilk çalışmayı yapmıştır. Biskup'un ortaya koyduğu öğrenme etkisi sıra bağımlı öğrenme etkisi olarak literatüre geçmiştir. Mosheiov [2] Biskup'un öğrenme etkisi faktörünü, farklı amaç fonksiyonları için değerlendirmiş ve polinom zamanlı çözüm algoritmasına sahip olanları sıralamıştır. Ayrıca, Mosheiov [2] çalışmasında paralel makine çizelgeleme problemleri için ilk defa öğrenme etkisini incelemiştir. Mosheiov ve Sidney [3] iş bağımlı öğrenme etkisini ortaya koymuşlardır. Mosheiov ve Sidney [3], tek makine çizelgeleme problemlerinde yayılma süresinin ve toplam akış süresinin en aza indirilmesinde polinom zamanlı öncelik kurallarının kullanılabilir olduğunu ispat etmişlerdir. Ayrıca ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemleri için teslim tarihi atama problemini inceleyip, bu problemin iş bağımlı öğrenme etkisi altında polinom zamanlı öncelik kuralları ile çözülebilir olduğunu göstermişlerdir. Bachman ve Janiak [4] sıra bağımlı öğrenme etkisi altında çizelgeleme problemlerinin genel karmaşıklık yapısını ortaya koymuş ve hangi problemlerin hangilerine indirgenebileceğini göstermiştir. Kuo ve Yang [5] zaman bağımlı öğrenme etkisini literatüre kazandırmışlardır ve ayrıca tek makine çizelgeleme problemlerinde, toplam ağırlıklı tamamlanma süresini en aza indirmede en kısa işlem süresi (EKİS) öncelik kuralının optimum çizelgeyi verdiğini ispatlamışlardır. Koulamas ve Kyparisis [6] EKİS öncelik kuralının öğrenme etkisi altındaki iki makineli akış tipi atölye problemlerinde de optimum çizelgeyi verdiğini göstermişlerdir. Eren ve Güner [7] öğrenme etkisi altındaki, toplam geç

kalma süresini en aza indirmeyi amaçlayan çizelgeleme problemleri için karma tamsayı matematiksel model ortaya koymuşlardır. Ayrıca, çalışmalarında, toplam geç kalma süresini minimize etmeye çalışan bazı sezgisel metotlara yer vermişlerdir.

Gupta ve Gupta [8], bir işin bekleme nedeniyle işlem süresinin artması kavramını literatüre kazandıran ilk çalışmayı sunmuşlardır. Daha sonraları bozulma etkisi olarak adlandırılacak bu kavram, iş parçasının kuyrukta ne kadar beklediğine bağlı olarak işlem süresinin artacağını ifade etmektedir. Browne ve Yechiali [9] bozulma oranının rassal olduğu bir tek makine çizelgeleme probleminde beklenen yayılma süresini en aza indirmek için bazı öncelik kuralları geliştirmişlerdir. Çalışmalarında, doğrusal fakat rassal bozulma oranını kullanmışlardır. Mosheiov [10] tüm işler için farklı bozulma etkilerinin söz konusu olduğu durumda, toplam akış süresini en aza indirme probleminde, optimum çizelgenin bozulma oranlarının önce çoktan aza, sonra da azdan çoğa doğru sıralandığı ve optimum çizelgenin V-şekline yaklaştığını göstermiştir. Masheiov [11] diğer bir çalışmasında basit doğrusal bozulma etkisi altında literatürde iyi bilinen çoğu tek makine çizelgeleme probleminin polinom zamanlı çözülebileceğini göstermiştir. Literatüre geçen bir diğer bozulma etkisi tipi olan adım-bozulma etkisi Mosheiov [12] tarafından tanıtılmıştır. Mosheiov [12] bu çalışmasında, önceden planlanmış bakım çalışmaları nedeniyle işlerin tamamlanması için harici zaman gereksinimi olmaktadır ve işlem sürelerinde artış yaşanmaktadır. İşlem sürelerindeki bu artışlar adım-bozulma etkisi olarak tanıtılmıştır. Mosheiov [13] işlerden bağımsız bozulma etkisi altında, toplam ağırlıklı tamamlanma süresinin en aza indirilmesinde, işlere ait işlem sürelerinin \wedge şeklinde sıralanmasının optimum çizelgeyi vereceğini göstermiştir.

Öğrenme etkisi, benzer işlerin sürekli tekrar edilmesi neticesinde, işi yapan birimin, çalışanın ya da sistemin bu tekrarlar neticesinde tecrübe kazanmasını ve her tekrarda işi önceden planlanan süreden daha hızlı tamamlamasını ifade etmektedir. Wang ve Cheng [14] tek makine çizelgeleme problemlerinde, sıra-bağımlı öğrenme

etkisi ve zaman-bağımlı bozulma etkisini eş zamanlı kullanarak yayılma süresini en aza indirmeye çalışmışlardır. Ortaya koydukları modeli çizelgeleme notasyonu ile ifade edersek, model $1|p_{i,r} = (p_0 + a_i t)r^\alpha|C_{max}$ şeklindedir. Wang [15] tek makine çizelgeleme problemlerini öğrenme ve bozulma etkileri altında incelemiş ve ağırlıklı tamamlanma süreleri toplamı için ağırlıklı en kısa işlem süresi (AEKİS) öncelik kuralının en iyi çizelgeyi verdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca maksimum gecikme probleminin aynı koşullar altında, ek kısa teslim tarihi (EKTT) öncelik kuralı ile optimum çizelgeye ulaştığını göstermiştir. Cheng, Wu ve Lee [16] öğrenme ve bozulma etkileri altında yayılma süresi, toplam tamamlanma süresi, ağırlıklı tamamlanma süresi ve maksimum geç kalma süresi gibi performans kriterleri için polinom zamanlı algoritmaların varlığını göstermişlerdir. Toksarı ve Güner [17] öğrenme ve bozulma etkisi altındaki paralel makine çizelgeleme problemlerinde ortak teslim zamanlı işlere ait toplam erken tamamlanma ve geç tamamlanma maliyetlerinin en aza indirilmesini amaçlayan bir karma tamsayı doğrusal olmayan model ortaya koymuşlardır. Toksarı ve Güner'in [18] diğer bir çalışmasında ise, ortak teslim zamanlı işlere ait erken tamamlanma sürelerinin ilk önce en çoktan en aza sıralanması, bu işlem ardından geç kalan işlerin geç kalma sürelerinin en azdan en çoğa doğru sıralanarak oluşturulan iki sıralamanın birleşiminden oluşan bir V-şekline göre oluşturulan çizelgelemenin, öğrenme ve bozulma etkisi altındaki paralel makine çizelgeleme problemleri için optimum çizelgeyi sağladığını ispatlamıştır. Öğrenme ve bozulma etkilerinin tek makine çizelgeleme problemlerindeki örnekleri için okuyucular [19], [20], [21], [22], [23], [24] [25], [26], [27], [28] ve [29] çalışmalarını inceleyebilirler.

Bulanık sayıların çizelgeleme problemlerinde kullanılmasının ilk örneklerinden birini Han, Ishii ve Fuji [30] gerçekleştirmiştir. Çalışmalarında maksimum geç kalma süresini en aza indirmeyi amaçlamışlardır ve teslim tarihlerini bulanıklaştırmışlardır. Ishii ve Tada [31] klasik 0-1 matrisi ile ifade edilen öncelik ilişkisi matrisini bulanık sayılar ile ifade etmişlerdir. Bulanık öncelik matrisi, karar vericinin hangi işin hangi işten önce yapılacağına dair isteğini bulanık sayılar ile göstermektedir. Çalışmanın iki amacı vardır, bunlar; maksimum geç kalma süresini en aza indirmek ve karar vericinin tatmin düzeyini en çoklamaktır. Liao ve Liao [32] çalışmalarında

bulanık teslim tarihi ve bulanık işlem süresini eşzamanlı olarak kullanarak her işin kendi teslim tarihine uymasının seviyelerini en çoklamaya çalışmışlardır. Çalışmalarında, işlerin tamamlanma tarihlerinin, her işe ait bulanık teslim süresi üyelik fonksiyonlarından elde edilen sayılardan minimum olanını en çoklayarak; işlerin tamamlanma zamanlarının, karar vericinin daha önce tasarladığı ve tatmin düzeyini yansıtan üyelik fonksiyonuna en uygun olmasını istemektedirler. Ayrıca, ortaya koydukları problemin polinom zamanlı çözülebilir olduğunu göstermişlerdir. Itoh ve Ishii [33] bulanık işlem süreleri ve bulanık teslim tarihleri ile toplam geç kalan iş sayısını en aza indirmeyi amaçlayan bir model sunmuşlardır. Chanas ve Kasperski [34] tek makine çizelgeleme problemlerinde, bulanık işlem süreleri ve teslim tarihlerini kullanarak en büyük bulanık tamamlanma süresini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında bulanık mantık ölçümlerinden, olabilirlik ve gereklilik ölçümlerini kullanmışlardır. Lam ve Cai [35] tek makine çizelgeleme problemlerinde farklı zamanlarda sisteme giren işler için bulanık teslim süreleri ile maksimum geç kalma süresini en aza indirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmalarında, genetik algoritma tekniğini kullanmışlardır. Wang ve arkadaşları [36] tek makine çizelgeleme problemlerinde hazır olma süresi problemini bulanık işlem süreleri ile incelemişlerdir. Çalışmalarında, şans kısıtlı programlama tekniği ile olabilirlik ve gereklilik ölçümlerinden faydalanmışlardır. Chanas ve Kasperski [37] benzer iki tek makine çizelgeleme problemini bulanık işlem süresi ve bulanık teslim tarihi ile incelemişlerdir. Bu problemler sırasıyla; maksimum beklenen bulanık geç kalma süresini en aza indirmek ve maksimum bulanık geç kalma süresinin beklenen değerini en aza indirmektir. Sung ve Vlach [38] belirsizlik altında, geç kalan iş sayısının en aza indirilmeye çalışıldığı tek makine çizelgeleme problemlerinde, bulanık işlem süresi ve bulanık teslim tarihlerini kullanmışlardır. Görüldüğü üzere bulanık parametreler kullanılarak incelenen tek makine çizelgeleme problemleri literatürde görünür bir şekilde artmaktadır. Daha fazla çalışma örneği için okuyucular [39], [40] ve [41] çalışmalarını inceleyebilirler.

Bulanık parametreler ile çizelgeleme problemlerinin kurgulanmasına yönelik artan ilgiye rağmen, bozulma ve öğrenme etkilerini bulanık ortamda inceleyen çalışma sayısı çok azdır. Mazdeh ve arkadaşları [42] toplam geç kalma süresini ve toplam yarı mamul sayısını en aza indirmeyi

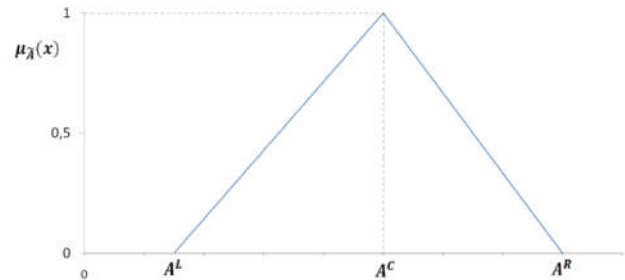
amaçlayan bir tek makine çizelgeleme problemi bozulma etkisi altında incelemiştir. Bulanık işlem süresi ve bulanık teslim tarihi kullandıkları çalışmalarında Bulanık Delphi yöntemini kullanmışlardır. Ahmadizar ve Hosseini [43] sıra bağımlı öğrenme etkisi altında, bulanık işlem süreleri ile tek makine çizelgeleme probleminde toplam tamamlanma süresini en aza indirmeye çalışmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, EKİS öncelik kuralının en optimum çizelgeyi verdiğini ispatlamışlardır. Ahmadizar ve Hosseini [44] diğer bir çalışmalarında, sıra bağımlı öğrenme etkisi altında bulanık işlem süreli tek makine çizelgeleme problemi için yayılma süresinin en aza indirilmesi modelini incelemiştir. Çalışmalarında şans kısıtlı programlama tekniğini kullanmışlardır. Toksarı ve Arık [45] bulanık tek makine çizelgeleme problemlerini bulanık öğrenme etkisi altındaki bulanık işlem süreleri ile iyi bilinen performans kriterleri için incelemiştir. Çalışmalarında bulanık şans kısıtlı programlama tekniği ile inceledikleri problemler için polinom zamanlı çözüm algoritmalarının olduğunu göstermişlerdir. Arık ve Toksarı [46] paralel makine çizelgeleme problemlerinde bulanık işlem süreleri ile literatürdeki farklı öğrenme ve bozulma etkileri ile karma tamsayı doğrusal olmayan modeller ve bir sezgisel yöntem önermişlerdir. Oluşturdukları test problemlerinde, iyi bilinen bulanık matematiksel programlama teknikleri ile kendi önerdikleri yerel arama sezgiselini kıyaslamışlardır. Büyük ölçekli problemlerin çözümünde sezgisel yöntemin çözüm süresi açısından etkili olduğunu belirtmişlerdir. Toksarı ve Arık [47] akış tipi çizelgeleme problemlerini bulanık öğrenme ve bozulma etkileri altında ortak bir bulanık teslim süresi için incelemiştir. Ele aldıkları problemin çözümü için bir genetik algoritma önermişlerdir.

2. VARSAYIMLAR VE TANIMLAR (ASSUMPTIONS AND DEFINITIONS)

Bu bölümde, modele ait varsayımlardan ve tanımlardan bahsedilmektedir. İşler arasında keyfi boş zamanlar bulunmamaktadır. İşlerin makinede işleniyorken bölünmelerine ve daha sonra tekrar işlenebiliyor olmalarına izin verilmemektedir. Tüm işlerin sisteme geliş zamanı sıfırdır ve makine başlangıçta tüm işleri işlemeye müsaittir. Öğrenme etkisi, bozulma etkisi, işlem süreleri ve teslim tarihleri üçgensel bulanık sayılarla ifade edilmiştir.

Konveks ve normalleştirilmiş bir bulanık kümeye ait olan bir bulanık sayı \tilde{A} için üyelerinin üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ile gösterilir ve üyelik fonksiyonu tüm reel sayılar için $[0,1]$ kapalı aralığında tanımlıdır ($\mu_{\tilde{A}}(x) : \mathbb{R} \rightarrow [0,1]$). Eğer \tilde{A} bulanık sayısı reel sayılar ekseninde $\tilde{A} = (A^L, A^C, A^R)$ gibi üç nokta ile ifade ediliyorsa, üyelik fonksiyonu $[A^L, A^C]$ kapalı aralığında sürekli olarak linear bir şekilde artıyor ve $[A^C, A^R]$ kapalı aralığında sürekli olarak linear bir şekilde azalıyor ise \tilde{A} bulanık sayısı üçgensel bulanık sayı olarak adlandırılır. Üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ise aşağıdaki ifade (1) 'de, üyelik fonksiyonunun görünümü ise şekil 1 'de görünebilir.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-A^L}{A^C-A^L}, & \text{if } A^C \geq x \geq A^L \\ \frac{A^R-x}{A^R-A^C}, & \text{if } A^C \geq x \geq A^R \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$



Şekil 1. Üçgensel Bulanık Sayı için Üyelik Fonksiyonu (The Membership Function for Triangular Fuzzy Number)

Olabilirlik dağılımı [48] ile X tanım kümesindeki her x elemanına bir olabilirlik derecesi $\pi_{\xi}(x) \in [0,1]$ atanmaktadır. Olabilirlik dağılımı X kümesi içerisinde farklı değerler alabilen ξ değişkenler hakkındaki belirsizliği temsil etmektedir. ξ bulanık değişkeninin X tanım kümesinin bir alt kümesi olan A kümesine ait olması olayının olabilirliği, $N(\xi \in A)$ şeklinde gösterilir ve ifade (2) ile hesaplanır.

$$\Pi(\xi \in A) = \sup_{\xi \in A} \mu(x) \quad (2)$$

Yukarıdaki ifade (2)'de belirtilen olabilirlik ölçümünün duali olarak gereklilik ölçümü kullanılır. $\xi \in A$ olayının gerekliliği $\Pi(\xi \in A)$ şeklinde gösterilir. A^C kümesi A kümesinin tümleyeni olmak üzere bir olayın gerekliliği aşağıdaki ifade (3) ile hesaplanır.

$$N(\xi \in A) = 1 - N(\xi \in A^C) = 1 - \sup_{\xi \in A^C} \mu(x) \quad (3)$$

$\xi \in A$ için A kümesinin herhangi bir r reel sayısından küçük sayılar kümesi olduğunu varsayalım. Bu durumda $\xi \in A$ ifadesini $\xi \leq r$ olarak ifade edebiliriz. Gereklilik ve olabilirlik ölçümleri ise aşağıdaki ifadeler (4-5) ile gösterilir.

$$\Pi(\xi \leq r) = \sup_{x \leq r} \mu(x) \quad (4)$$

$$N(\xi \leq r) = 1 - \left(\sup_{x > r} \mu(x) \right) \quad (5)$$

Gereklilik ve Olabilirlik birbirlerinin düali olmalarına rağmen, bu ölçümler kendi içlerinde düallerini barındırmazlar yani öz-düalleri yoktur. Matematiksel programlamada düallik ve konvekslik önemli kavramlardır. Bu durumdan yola çıkarak Liu ve Liu [49] güvenilirlik ölçümünü ortaya atmışlardır. Herhangi bir A kümesi ve onun tümleyeni A^C kümesi için bir ξ değişkeninin güvenilirlikleri $Cr(\xi \in A) + Cr(\xi \in A^C) = 1$ olacak şekilde öz-düaldir. Güvenilirlik ölçümü olabilirlik ve gereklilik ölçümlerinin ortalamasıdır ve aşağıdaki ifade (6) gibi hesaplanır.

$$Cr(\xi \leq r) = \frac{1}{2} (\Pi(\xi \leq r) + N(\xi \leq r)) \quad (6)$$

Üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x)$ olan bir üçgenel bulanık sayı $\tilde{A} = (A^L, A^C, A^R)$ için olabilirlik, gereklilik ve güvenilirlik ölçümleri sırasıyla, aşağıdaki ifadeler (7-8) gibi hesaplanır.

$$\Pi_A(A \leq r) = \begin{cases} 0, & r \leq A^L \\ \frac{r-A^L}{A^C-A^L}, & A^L \leq r \leq A^C \\ 1, & r \geq A^C \end{cases} \quad (7)$$

$$N_A(A \leq r) = \begin{cases} 0, & r \leq A^C \\ \frac{r-A^C}{A^R-A^C}, & A^C \leq r \leq A^R \\ 1, & r \geq A^R \end{cases} \quad (8)$$

$$Cr_A(A \leq r) = \begin{cases} 0, & r \leq A^L \\ \frac{r-A^L}{2(A^C-A^L)}, & A^L \leq r \leq A^C \\ \frac{A^R+r-2A^C}{2(A^R-A^C)}, & A^C \leq r \leq A^R \\ 1, & r \geq A^R \end{cases} \quad (9)$$

Olasılıksal değerlere sahip model parametrelerini modellemek ve çözmek için Charles ve Cooper [50] şans kısıtlı programlama tekniğini geliştirmişlerdir. Onların bu çalışmasına ek olarak belirsizliğin bulanık mantık ile modellendiği problemlerin çözümü için Liu ve Iwamura [51] şans kısıtlı programlama tekniğini bulanık mantığa göre tekrar kurgulamışlardır. Charles ve Cooper [50] bir olayın gerçekleşmesine ait olan şans değerini olasılıkla ifade etmişler, Liu ve Iwamura [51] ise şans değerini olabilirlik ölçümü ile ifade etmiştir. Olabilirlik ölçümünün yanında, bulanık parametreler ile yapılan şans kısıtlı programlama modellerinde gereklilik ve güvenilirlik ölçümleri de şans değerini ifade etmede kullanılmaktadır. Bu çalışma içerisinde şans değeri güvenilirlik ölçümü ile ifade edilecektir. Aşağıdaki modelde Liu ve Iwamura'nın [51] güvenilirlik ölçümüne göre tekrar ifade edilmiş haliyle şans kısıtlı programlama tekniğinin genel yapısı bulunmadır.

$$\max f(x)$$

$$s.t.: Cr\{\xi | g_i(x, \xi) \leq 0, i = 1, 2, \dots, p\} \geq \alpha,$$

burada x bir karar değişkeni vektörü, ξ bir bulanık model parametre vektörü, $f(x)$ amaç fonksiyonu ve $g_i(x, \xi)$ ise kısıt fonksiyonudur. $Cr\{\xi | g_i(x, \xi) \leq 0\}$ şans kısıdını $Cr\{\xi | h_i(x) \leq \xi_i\}$ olarak tekrar yazabiliriz. $h_i(x)$ x karar değişkeni için bir fonksiyon ve ξ_i ise üyelik fonksiyonu $\mu_{\xi_i}(x)$ olan bir bulanık sayıdır. Öyle ki herhangi bir güven aralığı α_i için, bir K_{α_i} değeri bulunmaktadır. Böylece $Cr\{\xi_i | K_{\alpha_i} \leq \xi_i\} = \alpha_i$ olarak şans kısıtımızı tekrar yazabiliriz. Güvenilirlik değeri α_i olan K_{α_i} değeri güvenilirlik fonksiyonunun tersidir $K_{\alpha_i} = Cr^{-1}(\alpha_i | K_{\alpha_i} \leq \xi_i)$. Böylelikle şans kısıdına ait net denkliği yazmış oluruz. Önceden belirlenmiş güven aralığı α_i değeri için hazırlanan şans kısıdını K_{α_i} değeri ile net denkliğine ulaştırıp, problemimizi modelleyebiliriz.

Bir fonksiyonun tersinin alınabilmesi için bire bir ve örten olması gerekiyor. Üçgenel bulanık sayıların güvenilirlik ölçümüne dair olan ifade (9)'deki fonksiyon A^L ve A^R arasında sürekli artış gösteren ve tek tepe değeri olan bir fonksiyonudur. Bu fonksiyonun ters fonksiyonu olan $Cr^{-1}(\alpha)$ fonksiyonu aşağıdaki ifade (10) ile gösterilebilir.

$$Cr^{-1}(\alpha) = \begin{cases} 2\alpha(A^C - A^L) + A^L, & 0 \leq \alpha \leq 0.5 \\ A^R - (2 - 2\alpha)(A^R - A^C), & 0.5 \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (10)$$

İş yapan çalışanın veya sistem birimin benzer işleri sürekli tekrarlaması nedeni ile kazandıkları tecrübenin onlara her iş tekrarında işi planlanandan daha hızlı yapmasına neden olan etkene öğrenme etkisi denilmektedir. Her yeni iş tekrarı işlem süresindeki azalma miktarını daha da artıracaktır. Çizelgeleme problemlerinde öğrenme etkisi ilk defa Biskup [1] tarafından net bir şekilde orta konmuştur. Biskup öğrenme etkisini, işin yapıldığı pozisyona bağlı bir fonksiyon olarak tanıtmıştır. Biskup'ın literatüre kattığı sıra bağımlı öğrenme etkisine ilaveten, Kuo ve Yang [5] zaman bağımlı öğrenme etkisini ortaya koymuşlardır. Bu çalışma içerisinde öğrenme etkisi, sıra bağımlı olarak kullanılmıştır. $P_{[r]}$, r pozisyonunda yapılan işin öğrenme etkisi a nedeniyle temel işlem süresi P_i' den daha az olarak gerçekleşen gerçek işlem süresini ifade ettiğini varsaydığımızda, sıra bağımlı öğrenme etkisi altında $P_{[r]}$ hesaplamasını aşağıdaki ifade (11) ile gösterebiliriz.

$$P_{[r]} = P_i r^a \quad (11)$$

İşlerin sistemde kuyrukta beklerken veya hatta makineler üzerinde işlenmekte iken işlem sürelerinin artmasına neden olan tüm etkenler bozulma etkisi olarak adlandırılır. Sisteme ne kadar çok iş yüklenirse, kuyruktaki yığılma o kadar fazla olacaktır ve kuyrukta bekleme işlem süresinin planlanandan daha fazla olmasına neden olacaktır. Alidaee ve Womer [52] tarafından bozulma etkisi üç farklı biçimde sınıflandırılmıştır. Bunlar sırasıyla: doğrusal, parçalı doğrusal ve doğrusal olmayan bozulma etkisi fonksiyonlarıdır. Bu çalışma içerisinde, doğrusal ve zamana bağımlı bozulma etkisi modele dahil edilmiştir. P_i , r pozisyonunda işlenecek işe ait temel işlem süresi, $C_{[r-1]}$ bir önceki pozisyona ait tamamlanma süresini ve B doğrusal bozulma etkisi olmak üzere, r pozisyonundaki işe ait gerçek işlem süresi $P_{[r]}$ hesaplaması aşağıdaki ifade (12) ile gösterilebilir.

$$P_{[r]} = P_i + B * C_{[r-1]} \quad (12)$$

Bozulma etkisini işlem süresini artırırken, öğrenme etkisi ise işlem süresini azalmaktadır. Bu çalışma içerisinde doğrusal zaman bağımlı bozulma etkisi ve sıra bağımlı öğrenme etkisi kullanılacaktır. Bu iki etki neticesinde, herhangi bir r sırasında gerçek işlem süresi aşağıdaki ifade (13) ile hesaplanır.

$$P_{[r]} = (P_i + B * C_{[r-1]})r^a \quad (13)$$

3. KARMA TAMSAYILI DOĞRUSAL OLMAYAN PROGRAMLAMA MODELİ (MIXED INTEGER NONLINEAR PROGRAMMING MODEL)

Bu bölümde, önceki bölümde tanıtılan güvenilirlik ölçütüne dayalı şans kısıtlı programlama tekniği ile elde edilen şans kısıtlarının önceden belirlenmiş bir güven aralığı değeri için E/G problemi kurulacaktır. Teslim tarihinden önce tamamlanan işler erken tamamlanan işler, sonra tamamlanan işler ise geç tamamlanan işler olarak adlandırılırlar. Bu iki değerinin karar verici tarafından önceden belirlenmiş ağırlıklarının toplamını en aza indirmek üzere, bulanık iş bozulması ve öğrenme etkisi altında, tüm parametreleri bulanık sayılar ile ifade edilmiş modelimiz aşağıdaki gibidir.

İndisler (Indexes)

i : işlere ait endeks $i = 1, \dots, N$

r : makinede yapılacak işlerin sıra numarası endeksi $r = 1, \dots, N$

Parametreler (Parameters)

P_i^L : i işine ait beklenen en kısa işlem süresi

P_i^C : i işine ait beklenen en olası işlem süresi

P_i^R : i işine ait beklenen en kötü işlem süresi

D_i^L : i işine ait beklenen en kısa teslim süresi

D_i^C : i işine ait beklenen en olası teslim süresi

D_i^R : i işine ait beklenen en kötü teslim süresi

a^R : Beklenen en yüksek öğrenme etkisi katsayısı

a^C : En olası öğrenme etkisi katsayısı

a^L : Beklenen en düşük öğrenme etkisi katsayısı

B^R : Beklenen en yüksek bozulma etkisi katsayısı

B^C : En olası bozulma etkisi katsayısı

B^L : Beklenen en düşük bozulma etkisi katsayısı

e_i : i işinin erken tamamlanma ağırlığı

t_i : i işinin geç tamamlanma ağırlığı

α : Önceden belirlenmiş ortak güven aralığı

Karar Değişkenleri (Decision Variables)

E_i : i işinin erken tamamlanma süresi

T_i : i işinin geç tamamlanma süresi

$C_{[r]}$: r sırasında yapılan işin gerçek tamamlanma süresi

$P_{[r]}$: r sırasında yapılan işin gerçek işlem süresi

C_i : i işinine ait tamamlanma süresi

$X_{i,[r]}$: $\begin{cases} 1, & \text{eğer } i \text{ işi } r \text{ sırasına atanmışsa} \\ 0, & \text{diğer} \end{cases}$

Y : $\begin{cases} 1, & \text{eğer } 0 \leq \alpha \leq 0.5 \\ 0, & \text{eğer } 0.5 < \alpha \leq 1 \end{cases}$

K_{pi}^α : i işine ait işlem süresinin, α güven aralığı

için denkliği (güvenirlilik fonksiyonun ters değeri)

K_{di}^α : i işine ait teslim süresinin, α güven aralığı

için denkliği (güvenirlilik fonksiyonun ters değeri)

K_a^α : öğrenme etkisi katsayısının, α güven aralığı

için denkliği (güvenirlilik fonksiyonun ters değeri)

K_B^α : bozulma etkisi katsayısının, α güven aralığı

için denkliği (güvenirlilik fonksiyonun ters değeri)

Model (Model)

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N e_i E_i + t_i T_i \quad (14)$$

S.T.:

$$C_i + E_i - T_i = K_{di}^\alpha \quad \forall i \quad (15)$$

$$C_{[r]} = C_{[r-1]} + P_{[r]} \quad \forall r \quad (16)$$

$$P_{[r]} = \left(\sum_{i=1}^N X_{i,[r]} * K_{pi}^\alpha + K_B^\alpha (C_{[r-1]}) \right) r^{K_a^\alpha} \quad \forall r \quad (17)$$

$$K_{pi}^{\alpha} = Y(2\alpha(P_i^C - P_i^L) + P_i^L) + (1 - Y)(P_i^R - (2 - 2\alpha)(P_i^R - P_i^C)) \quad \forall i \quad (18)$$

$$K_{di}^{\alpha} = Y(2\alpha(D_i^C - D_i^L) + D_i^L) + (1 - Y)(D_i^R - (2 - 2\alpha)(D_i^R - D_i^C)) \quad \forall i \quad (19)$$

$$K_a^{\alpha} = Y(2\alpha(a^C - a^L) + a^L) + (1 - Y)(a^R - (2 - 2\alpha)(a^R - a^C)) \quad (20)$$

$$K_B^{\alpha} = Y(2\alpha(B^C - B^L) + B^L) + (1 - Y)(B^R - (2 - 2\alpha)(B^R - B^C)) \quad (21)$$

$$C_i = \sum_{r=1}^N X_{i,[r]} C_{[r]} \quad \forall i \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^N X_{i,[r]} = 1 \quad \forall r \quad (23)$$

$$\sum_{r=1}^N X_{i,[r]} = 1 \quad \forall i \quad (24)$$

$$C_{[0]} = 0 \quad (25)$$

$$C_{[r]}, P_{[r]}, C_i, E_i, T_i, K_{pi}^{\alpha}, K_{di}^{\alpha} \geq 0 \quad \forall i, r \quad (26)$$

$$-1 \leq K_a^{\alpha} \leq 0 \quad (27)$$

$$0 \leq K_B^{\alpha} \leq 1 \quad (28)$$

$$X_{i,[r]} \in \{0,1\} \quad \forall i, r \text{ ve } Y \in \{0,1\} \quad (29)$$

Yukarıda ki modelin amaç fonksiyonu (14) işler için önceden belirlenmiş erken tamamlanma ve geç tamamlanma ceza ağırlıklarını kullanarak, işlerin teslim tarihlerinden sapmaları en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Kısıt (15) önceden belirlenmiş güven aralığı için hesaplanmış olan teslim süresinin işin tamamlanma süresi, erken bitirme süresi ve geç bitirme süresine bağlı olduğunu göstermektedir. Kısıt (16) r pozisyonunda tamamlanacak olan işe ait gerçek tamamlanma süresinin, gerçek işlem süresine ve bir önceki pozisyondaki tamamlanma süresine bağlı olduğu gösterilmektedir. Kısıt (17) önceden belirlenmiş güven aralığı α için r pozisyonundaki gerçek işlem süresinin hesaplanmasını göstermektedir. Kısıt (17)'de, kendisinden bir önceki sırada işlenen işin tamamlanmasını beklerken, mevcut pozisyondaki işe ait işlem süresi artmaya ve aynı zamanda da kendisinden yapılan işlerin kazandırmış olduğu tecrübe ile de mevcut pozisyondaki işe ait işlem süresi azalmaya devam etmektedir. Kısıtlar (18-21) ile önceden belirlenmiş güven aralığı α için, sırasıyla işlem süreleri, teslim tarihleri, öğrenme etkisi katsayısı ve bozulma etkisi katsayısı hesaplanmaktadır. Bu kısıtlarda, ifade (10)' ile gösterilen, üçgensel bulanık sayılara ait güvenilirlik dağılımının ters fonksiyonunun önceden belirlenmiş güven aralığı α için değerleri hesaplanmaktadır. Kısıt (22)'de ise

herhangi bir r sırasında işlenen işin tamamlanma süresi olan ($C_{[r]}$), o sıraya atanmış olan i işi için tamamlanma süresine (C_i) çevrimi işlemi gerçekleştirilmektedir. Kısıt (23) ile her işin sadece bir sırada işlenebileceği garantiye alınmıştır. Kısıt (24) ile ise her sırada sadece bir işin işlenebileceği garantiye alınmış olmaktadır. Kısıt (25) ile makinenin işleri sırayla işlemeye başlamaya hazır olduğu andaki sürenin sıfır olduğu belirtilmiştir. Yukarıdaki modelde kısıt (26) ile r sırasındaki işe ait gerçek işlem ve tamamlanma sürelerinin ve i işine ait erken tamamlanma, geç tamamlanma, α güven aralığındaki temel işlem süresi ve teslim sürelerinin negatif değerler olmadığını gösterilmektedir. Kısıt (27) ile α güven aralığındaki öğrenme etkisi katsayısının -1 ve 0 arasında bir değer olduğu gösterilmektedir. Kısıt (28) ile α güven aralığındaki bozulma etkisi katsayısının 0 ve 1 arasında bir değer olduğu gösterilmektedir. Kısıt (29) ile işlerin hangi sırada işleneceğini gösteren karar değişkenleri $X_{i,[r]}$ ile önceden belirlenmiş güven aralığı α 'ya göre değer alacak olan karar değişkeni Y değerinin sadece ikili değerler alabileceği gösterilmiştir.

4. SAYISAL ÖRNEK (NUMERICAL EXAMPLE)

Bu bölümde bir önceki bölümde tanıtılan matematiksel model için örnek veri seti ve sayısal örnek tanıtılacaktır. Bu bölümde tanıtılan sayısal örnekteki bulanık işlem süreleri, teslim tarihleri, öğrenme ve bozulma etkisi katsayıları örnek olması amaçlı oluşturulmuştur. Tek makine ya da işlemcide işlenmeye hazır olan on adet iş olduğunu varsayalım. Bu işlere ait işlem süreleri üçgensel bulanık sayılar ile ifade edilmiş ve yine bu işlere ait teslim süreleri de bulanık sayılar ile ifade edilmiştir. Aynı makine ya da işlemcide birbirine benzer işlerin sürekli tekrarı ise her tekrarda işlem sürelerinin azalmasına neden olmaktadır. Yine işler işlenmek için kuyrukta beklerken, iş yeri ortam koşulları nedeniyle veya işlem karakteristikleri nedeniyle işlem süreleri artmaktadır. Öğrenme ve bozulma etkileri katsayıları işlem sırasından bağımsız yani statiktir; fakat üçgensel bulanık sayılar ile ifade edilmişlerdir. Bu nedenle bu tek makine / işlemci çizelgeleme problemi öğrenme ve bozulma etkisi altındadır. Karar verici işlerin tam zamanında teslim edilmesini istemektedir. Bu nedenle işlere ait erken tamamlanma ve geç tamamlanma süreleri

için ağırlıklar belirlemiştir. Problemin amacı öğrenme ve bozulma etkisi altında erken ve geç tamamlanma sürelerinin ağırlıklı toplamını en aza indirmektir. Sayısal örneğe ait veriler Tablo 1’de verilmiştir. Bu örnek için bulanık üçgensel öğrenme etkisi katsayısı $\tilde{a} = \{-0,08; -0,05; -0,02\}$ ve bulanık üçgensel bozulma etkisi katsayısı $\tilde{B} = \{0,02; 0,05; 0,08\}$ olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Sayısal Örnek için Veriler
(Data for Numerical Example)

i	\tilde{P}_i	\tilde{D}_i	e_i	t_i
1	(10,12,14)	(30,33,36)	10	20
2	(8,9,13)	(28,29,33)	20	30
3	(6,7,9)	(13,18,20)	15	5
4	(12,13,17)	(21,28,35)	5	12
5	(16,18,19)	(45,50,55)	9	17
6	(7,9,12)	(23,30,39)	13	9
7	(5,9,13)	(17,22,27)	18	2
8	(12,14,19)	(32,37,39)	19	27
9	(17,19,20)	(41,44,48)	23	23
10	(17,18,21)	(63,70,72)	12	11

Önceden belirlenmiş farklı güven aralığı değerleri için oluşturulan çizelgeler Tablo 2’de ve bu çizelgelerdeki işlere ait tamamlanma süreleri Tablo 3’de sunulmuştur. Tablo 2’de verilen sonuçlar GAMS 21.6 yazılımı içerisindeki DICOPT çözücüsü ile elde edilmiştir. Aşağıdaki tablo 2’de görülebileceği üzere, güven aralığı değeri arttıkça amaç fonksiyonu değeri de artmaktadır. Bu artışın nedeni güven aralığı arttıkça üçgensel bulanık işlem süresi, teslim tarihi, bozulma etkisi ve öğrenme etkisi gibi değerlerin artarak tanımlı aralıktaki en büyük değere yaklaşmalarıdır. İlk işe ait bulanık işlem süresinin 0,1 güven aralığındaki denkliği 10,4 iken aynı işin 0.9 güven aralığındaki işlem süresinin denkliği 13,6 değeridir. Bu sayısal örnekte de görülebileceği gibi kapalı bir aralıkta tanımlanan belirsiz değerlerden oluşan bir matematiksel modelin optimum sonucunun sahip olabileceği en büyük ve en küçük değerlerde kapalı bir aralık içerisinde sunulabilir. Tablo 2’deki sonuçlara göre optimum çizelgenin amaç fonksiyonunun değeri [2840,257; 5321,215] kapalı aralıktadır.

Tablo 2. Sayısal Örnek için Sonuçlar
(Results for Numerical Example)

Güven Aralığı	Amaç Fonksiyonu Değeri	Çizelge
0,00	2840,257	6,2,1,8,9,5,3,4,7,10
0,05	2902,396	6,2,1,8,9,5,3,4,10,7
0,10	2896,164	3,2,1,8,6,9,5,4,10,7
0,15	3054,626	3,6,2,8,1,9,5,4,10,7
0,20	3189,731	3,6,2,8,1,9,5,4,10,7
0,25	3343,107	3,6,2,8,1,9,5,4,10,7
0,30	3470,962	3,6,2,8,1,9,4,5,10,7

0,35	3617,280	3,6,2,8,1,9,4,5,10,7
0,40	3745,255	2,1,8,9,5,6,4,10,3,7
0,45	3869,884	2,1,8,9,5,6,4,3,10,7
0,50	3975,327	2,1,8,9,5,6,4,10,3,7
0,55	3976,111	4,2,8,1,9,6,5,10,3,7
0,60	4113,894	4,2,8,1,9,6,5,10,3,7
0,65	4363,396	1,2,8,6,9,4,3,5,10,7
0,70	4496,497	2,1,8,9,5,4,6,3,10,7
0,75	4631,750	2,1,8,9,5,4,6,3,10,7
0,80	4770,859	2,1,8,9,5,4,6,3,10,7
0,85	4873,405	2,1,8,9,5,4,6,10,3,7
0,90	5061,087	2,1,8,9,5,4,6,3,10,7
0,95	5149,565	1,2,8,6,9,4,5,10,3,7
1,00	5321,215	2,1,8,9,5,4,6,10,3,7

Tablo 3. Sayısal Örnek için Tamamlanma Süreleri
(Completion Times for Numerical Example)

$\alpha \setminus C_i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,00	24.129	14.701	71.871	83.249	65.613	7.000	88.840	35.301	50.868	104.457
0,05	24.726	15.036	85.785	79.039	67.290	7.200	108.375	36.202	52.133	101.889
0,10	16.233	24.182	6.200	87.241	75.107	43.339	110.955	35.940	59.565	103.788
0,15	44.073	21.754	6.300	89.217	76.687	13.709	114.113	33.745	60.696	106.232
0,20	45.216	22.248	6.400	91.670	78.718	14.036	117.812	34.545	62.255	109.181
0,25	46.377	22.747	6.500	76.826	94.026	14.365	121.453	35.355	63.842	112.050
0,30	47.555	23.251	6.600	96.753	82.908	14.695	125.535	36.174	65.458	115.320
0,35	48.751	23.759	6.700	99.388	85.069	15.027	129.566	37.004	67.103	118.515
0,40	20.331	8.800	126.149	96.033	70.750	81.345	138.236	33.961	52.554	115.637
0,45	20.678	8.900	108.838	98.511	72.251	83.342	142.315	34.614	53.594	129.324
0,50	21.026	9.000	133.549	101.044	73.775	85.377	147.522	35.273	54.646	121.820
0,55	50.480	22.580	137.014	13.100	103.274	82.666	151.967	37.202	70.762	124.653
0,60	51.437	22.841	140.913	13.200	105.857	84.618	156.900	37.780	72.194	127.876
0,65	12.600	22.362	97.392	85.969	119.749	48.744	159.883	37.580	69.785	142.929
0,70	22.435	9.400	125.217	97.263	80.105	111.965	167.477	37.964	58.981	149.285
0,75	22.791	9.500	128.709	99.419	81.749	114.797	172.944	38.651	60.097	153.586
0,80	23.149	9.600	132.291	101.615	83.417	117.692	178.585	39.344	61.226	158.013
0,85	23.508	9.700	163.295	103.854	85.111	120.653	185.178	40.042	62.369	146.323
0,90	23.869	9.800	139.739	106.136	86.831	123.679	190.411	40.747	63.526	167.262
0,95	13.800	24.589	170.852	98.798	125.006	55.423	195.279	41.841	79.579	152.200
1,00	24.596	10.000	177.901	110.832	90.351	129.940	203.907	42.173	65.881	158.138

Bu sayısal örnekte artan güven aralığının amaç fonksiyonu değerini nasıl artırdığı gösterilmeye çalışılmıştır. Bu nedenle tüm parametrelere dair sabit oranda artan ortak güven aralıkları kullanılmıştır. Karar verici güven aralıklarını her parametre için farklı kullanmak istediği zaman, her bir parametre için belirsizliğin ne oranda gerçekleşeceğine dair güven aralıklarını saptaması gerekecektir. Ayrıca, bu sayısal örnekte olduğu gibi belirli oranlarda her parametre için güven aralıklarının artırılması veya azaltılması yoluyla optimum sonuç için daha detaylı bir çözüm uzayı elde edilebilir ama yine çözüm uzayının alt ve üst sınırları güven aralığının tüm parametreler için 0

ve 1 olduğu değerler olacaktır. Sunulan örnekte tüm işler için sabit bulanık öğrenme ve bozulma etkileri kullanılmıştır. Bu durumun aksi de mümkündür, karar verici her işin kendisinden önce yapılan işlerden ne kadar etkilendiğini ve dolayısıyla ne miktarda öğrenebileceğini ya da bozulacağını yine bulanık sayılar ile modelleyebilir. Bu çalışma içerisinde sunulan modelde erken/geç tamamlanma ağırlıkları deterministik sayılar ile sunulmuştur. Yine, karar verici problemin karmaşıklığını artırmayı göz önünde bulundurarak erken/geç tamamlanma ağırlıklarını bulanıklaştırmayı düşünebilir.

5. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR (CONCLUSION AND FUTURE RESEARCHES)

Bu çalışmada bulanık öğrenme ve bozulma etkileri altındaki bulanık işlem sürelerinin, bulanık teslim tarihleri dikkate alındığında ağırlıklı erken/geç tamamlanma maliyetlerinin en aza indirilmesi problemi incelenmiştir. İncelenen probleme bulanık karma tam sayılı doğrusal olmayan bir matematiksel model önerilmiş ve ardından bu modelin bulanık şans kısıtlı programlama tekniği ile belli güven aralıklarındaki net denklikleri ile bir sayısal örnek sunulmuştur. Bu çalışma içerisinde şans kısıtlı programlama için bulanık ölçümlerden güvenilirlik ölçümü kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda, literatürde yer alan farklı bulanık matematiksel programlama tekniklerinden, olabirsel programlama veya tamamıyla bulanık programlama yöntemleri ile problem tekrar ele alınabilir. Gelecek çalışmalarda problemin makine karakteristiği daha da karmaşık bir hale getirilerek paralel makine çizelgeleme problemleri için ve diğer iş karakteristikleri (öncelik ilişkisi, sıra bağımlı hazırlık süresi, yığın işleme ...) eklenerek incelenebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] D. Biskup, "Single-machine scheduling with learning considerations," *European Journal of Operational Research*, cilt 115, no. 1, pp. 173-178, 1999.
- [2] G. Mosheiov, "Scheduling problems with a learning effect," *European Journal of Operational Research*, cilt 132, no. 3, pp. 687-693, 2001.
- [3] G. Mosheiov ve J. B. Sidney, "Scheduling with general job-dependent learning curves," *European Journal of Operational Research*, cilt 147, no. 3, pp. 665-670, 2003.
- [4] A. Bachman ve A. J. Janiak, "Scheduling jobs with position-dependent processing times," *Journal of the Operational Research Society*, cilt 55, no. 3, p. 257-264, 2004.
- [5] W. H. Kuo ve D. Yang, "Minimizing the total completion time in a single machine scheduling problem with a time dependent learning effect," *European Journal of Operational Research*, cilt 178, no. 2, pp. 1184-1190, 2006.
- [6] C. P. Koulamas ve G. J. Kyparisis, "Single-machine and two-machine flowshop scheduling with general learning functions," *European Journal of Operational Research*, cilt 178, no. 2, pp. 402-407, 2007.
- [7] T. Eren ve E. Güner, "Minimizing total tardiness in a scheduling problem with a learning effect," *Applied Mathematical Modelling*, cilt 31, no. 7, pp. 1351-1361, 2007.
- [8] J. N. D. Gupta ve S. K. Gupta., "Single facility scheduling with nonlinear processing times," *Computer and Industrial Engineering*, cilt 14, pp. 387-393, 1988.
- [9] S. Browne ve U. Yechiali, "Scheduling deteriorating jobs on a single processor," *Operations Research*, cilt 38, pp. 495-498, 1990.
- [10] G. Mosheiov, "V-shaped policies for scheduling deteriorating jobs," *Operations Research*, cilt 39, pp. 979-991, 1991.
- [11] G. Mosheiov, "Scheduling jobs under simple linear deterioration," *Computers and Operations Research*, cilt 21, no. 6, pp. 653-659, 1994.
- [12] G. Mosheiov, "Scheduling jobs with step-deterioration; Minimizing makespan on a single machine," *Computers and Industrial Engineering*, cilt 28, pp. 869-879, 1995.
- [13] G. Mosheiov, "Λ-shaped policies to schedule deteriorating jobs," *Journal of Operations Research Society*, cilt 47, pp. 1184-1191, 1996.
- [14] X. Wang ve T. Cheng, "Single-machine scheduling with deteriorating jobs and learning effects to minimize the makespan," *European Journal of Operational Research*, cilt 178, no. 1, pp. 57-70, 2007.

- [15] J. Wang, "Single-machine scheduling problems with the effects of learning and deterioration," *Omega*, cilt 35, no. 4, pp. 397-402, 2007.
- [16] T. Cheng, C. Wu ve W. Lee, "Some scheduling problems with deteriorating jobs and learning effects," *Computers and Industrial Engineering*, cilt 54, no. 4, pp. 972-982, 2008.
- [17] M. D. Toksarı ve E. Guner, "Minimizing the earliness/tardiness costs on parallel machine with learning effects and deteriorating jobs: A mixed nonlinear integer programming approach," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, cilt 38, no. 7-8, pp. 801-808, 2008.
- [18] M. D. Toksarı ve E. Güner, "Parallel machine earliness/tardiness scheduling problem under the effects of position based learning and linear/nonlinear deterioration," *Computers & Operations Research*, cilt 36, no. 8, pp. 2394-2417, 2009.
- [19] J. Wang, X. Huang, X. Wang, N. Yin ve L. Wang, "Learning effect and deteriorating jobs in the single machine scheduling problems," *Applied Mathematical Modelling*, cilt 33, pp. 3848-3853, 2009.
- [20] J. Wang ve Q. Guo, "A due-date assignment problem with learning effect and deteriorating jobs," *Applied Mathematical Modelling*, cilt 34, pp. 309-313, 2010.
- [21] Y. Wu, M. Wang ve J. Wang, "Some single-machine scheduling with both learning and deterioration effects," *Applied Mathematical Modelling*, cilt 35, pp. 3731-3736, 2011.
- [22] S. Yang, "Group scheduling problems with simultaneous considerations of learning and deterioration effects on a single-machine," *Applied Mathematical Modelling*, cilt 35, pp. 4008-4016, 2011.
- [23] P. Lai ve W. Lee, "Scheduling problems with general effects of deterioration and learning," *Information Sciences*, cilt 181, pp. 1164-1170, 2011.
- [24] J. Bai, Z. Li ve X. Huang, "Single-machine group scheduling with general deterioration and learning effects," *Applied Mathematical Modelling*, cilt 36, pp. 1267-1274, 2012.
- [25] S. Yang, "Single-machine scheduling problems simultaneously with deterioration and learning effects under deteriorating multi-maintenance activities consideration," *Computers and Industrial Engineering*, cilt 62, pp. 271-275, 2012.
- [26] J. Wang, C. Hsu ve D. Yang, "Single-machine scheduling with effects of exponential learning and general deterioration," *Applied Mathematical Modelling*, cilt 37, pp. 2293-2299, 2013.
- [27] J. Wang, L. Liu ve C. Wang, "Single machine SLK/DIF due window assignment problem with learning effect and deteriorating jobs," *Applied Mathematical Modelling*, cilt 37, pp. 8394-8400, 2013.
- [28] S. H. Pakzad-Moghaddam, H. Mina ve R. Tavakkoli-Moghaddam, "An approach for modeling a new single machine scheduling problem with deteriorating and learning effects," *Computers & Industrial Engineering*, cilt 78, pp. 33-43, 2014.
- [29] X. Huang, M. Z. Wang ve P. Ji, "Parallel machines scheduling with deteriorating and learning effects," *Optimization Letters*, cilt 8, no. 2, pp. 493-500, 2014.
- [30] S. Han, H. Ishii ve S. Fujii, "One machine scheduling problem with fuzzy due dates," *European Journal of Operational Research*, cilt 79, pp. 1-12, 1994.
- [31] H. Ishii ve M. Tada, "Single machine scheduling problem with fuzzy precedence relation," *European Journal of Operational Research*, cilt 87, no. 2, pp. 284-288, 1995.
- [32] L. Liao ve C. Liao, "Single machine scheduling problem with fuzzy due date and processing time," *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, cilt 21, no. 2, pp. 189-196, 1998.
- [33] T. Itoh ve H. Ishii, "Fuzzy due-date scheduling problem with fuzzy processing time," *International Transactions in Operational Research*, cilt 6, no. 6, pp. 639-647, 1999.
- [34] S. Chanas ve A. Kasperski, "Minimizing maximum lateness in a single machine scheduling problem with fuzzy processing times and fuzzy due dates," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, cilt 14, pp. 377-386, 2001.
- [35] S. Lam ve X. Cai, "Single machine scheduling with nonlinear lateness cost functions and fuzzy due dates," *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, cilt 3, pp. 307-316, 2002.

- [36] C. Wang, D. Wang, W. Ip ve D. Yuen, "The single machine ready time scheduling problem with fuzzy processing times," *Fuzzy Sets and Systems*, cilt 127, pp. 117-129, 2002.
- [37] S. Chanas ve A. Kasperski, "On two single machine scheduling problems with fuzzy processing times and fuzzy due dates," *European Journal of Operational Research*, cilt 147, pp. 281-296, 2003.
- [38] S. Sung ve M. Vlach, "Single machine scheduling to minimize the number of late jobs under uncertainty," *Fuzzy Sets and Systems*, cilt 139, pp. 421-430, 2003.
- [39] K. Muthusamy, S. Sung, M. Vlach ve H. Ishii, "Scheduling with fuzzy delays and fuzzy precedences," *Fuzzy Sets and Systems*, cilt 134, pp. 387-395, 2003.
- [40] S. Chanas ve A. Kasperski, "Possible and necessary optimality of solutions in the single machine scheduling problem with fuzzy parameters," *Fuzzy Sets and Systems*, cilt 142, no. 3, pp. 359-371, 2004.
- [41] T. Itoh ve H. Ishii, "One machine scheduling problem with fuzzy random due-dates," *Fuzzy Optimization Decision Making*, cilt 4, pp. 71-78, 2005.
- [42] M. Mazdeh, F. Zaerpour ve F. Jahantigh, "A fuzzy modeling for single machine scheduling problem with deteriorating jobs," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, cilt 1, no. 2, pp. 147-157, 2010.
- [43] F. Ahmadizar ve L. Hosseini, "Single-machine scheduling with a position-based learning effect and fuzzy processing times," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, cilt 65, pp. 693-698, 2011.
- [44] F. Ahmadizar ve L. Hosseini, "Minimizing makespan in a single-machine scheduling problem with a learning effect and fuzzy processing times," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, cilt 65, pp. 581-587, 2013.
- [45] M. D. Toksarı ve O. A. Arik, "Single machine scheduling problems under position-dependent fuzzy learning effect with fuzzy processing times," *Journal of Manufacturing Systems*, cilt C, no. 45, pp. 159-179, 2017.
- [46] O. Arik ve M. Toksarı, "Multi-objective fuzzy parallel machine scheduling problems under fuzzy job deterioration and learning effects," (Article in Press).
- [47] M. Toksarı ve O. A. Arik, "Genetic algorithm applied to the flow shop scheduling problem under effects of fuzzy learning and deterioration with a common fuzzy due date," *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, cilt 4, no. 10, pp. 306-3016, 2017.
- [48] L. Zadeh, "Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility.," *Fuzzy Sets and Systems*, cilt 1, pp. 3-28, 1978.
- [49] B. Liu ve Y.-K. Liu, "Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models," *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, cilt 10, no. 4, pp. 445-450, 2002.
- [50] A. Charnes ve W. Cooper, "Chance-constrained programming," *Management Science*, cilt 94, no. 227-282, pp. 73-79, 1959.
- [51] B. Liu ve K. Iwamura, "Chance constrained programming with fuzzy parameters," *Fuzzy Sets and Systems*, cilt 94, pp. 227-282, 1998.
- [52] B. Alidaee ve N. Womer, "Scheduling with time dependent processing times: review and extensions," *Journal of Operation Research Society*, cilt 50, no. 7, pp. 711-720, 1999.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 19.06.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 21.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.322466	

Ni, Ni-B ve Ni-B/hBN kaplamaların elektrodepolanmasında banyo bileşenlerinin kaplama özelliklerine etkisinin incelenmesi

Ersin Ünal^{*1}, İsmail Hakkı Karahan²

ÖZ

Bu çalışmada, saf nikel, Ni-B alaşım ve Ni-B/hBN kompozit kaplamalar elektrodepolama yoluyla üretilmiştir. Bu kaplamaları elde etmek için banyoya eklenen bileşenlerin miktarları sabit tutulmuş ve her birinin ayrı ayrı kaplama üzerine etkileri araştırılmıştır. Üretilen kaplamaların kristal yapıları XRD ile, yüzey morfolojileri ve kimyasal içerik analizleri SEM ve EDS ile, elektrokimyasal davranışları ise dönüşümlü voltametri (CV) ile incelenmiştir. Ayrıca kaplamaların korozyon dayanımları % 3.5 NaCl içeren çözelti içerisinde açık devre potansiyeli ve Tafel ekstrapolasyon metotlarıyla belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre ince taneli, düzgün yüzeyli ve kompakt kaplamalar üretilmiştir. Banyoya eklenen bileşenler kristal yapıyı, korozyon dayanımını ve diğer özellikleri ciddi derecede etkilemektedir.

Anahtar Kelimeler: Elektrodepolama, Kompozit kaplamalar, Korozyon

Investigation of effect of the bath components on coating properties in electrodeposition of Ni, Ni-B and Ni-B/hBN coatings

ABSTRACT

In this study, pure nickel, Ni-B alloy and Ni-B/hBN composite coatings were produced by electrodeposition. To obtain these coatings, the amounts of the components added to the bath were kept constant and the effects of bath components on the coatings were investigated separately. Electrochemical behaviors, crystal structures, surface morphologies and chemical composition of films analysed with cyclic voltammetry (CV), XRD, SEM and EDS, respectively. Additionally corrosion resistance of the coatings was evaluated by open circuit potential and Tafel extrapolation methods in %3,5 w.t. NaCl solution. The results obtained in this study indicate that smooth, compact and fine grained coatings were produced. The components added to the electrolyte were affect crystal structure, corrosion resistance and other properties seriously.

Keywords: Electrodeposition, Composite coatings, Corrosion

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karacaoğlan Yerleşkesi, Osmaniye, ersinunal@osmaniye.edu.tr

² Mustafa Kemal Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, Tayfur Sökmen Kampüsü, Hatay, ihkarahan@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüzey bitirme işlemleri birçok değişik endüstri alanında malzemelerin sertlik, triboloji, korozyon ve aşınma direnci gibi yüzey özelliklerini geliştirmek için kullanılmaktadır [1]. Yüzey bitirme işlemleri için çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Bu yöntemlerden en dikkat çekenlerden bir tanesi de elektrokimyasal kaplama tekniğidir. Elektro-kaplama elektrik akımıyla bir yüzey üzerine genellikle metal ya da alaşımların, yoğun, üniform ve yapışkan bir şekilde kaplandığı bir elektro-depolama prosesidir [2]. Elektro-kaplama yüzey bitirme ve mikrofabrikasyon için geniş bir şekilde kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bilim ve teknolojideki gelişmeler kaplama performansının daha üst seviyelere çıkarılması gereksinimini ortaya çıkarmıştır ve kompozit kaplamaların mükemmel fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı, eş-depolama tekniği kaplamaların performanslarının geliştirilmesi için en etkili yollardan biri olarak göz önüne alınabilir [3]. Seramik/metal kompozitlerinin geliştirme çalışmaları üstün mekanik ve çok fonksiyonlu özelliklerinden dolayı çok fazla dikkat çekmektedir. Kompozit elektrokaplama bir kaplama banyosunda metal veya alaşımlarla birlikte metalik ya da metalik olmayan bileşiklerin çözünmeyen parçacıklarının eşdepolanması metodudur. Bu kaplamalarda ikinci faz parçacıkların takviyesiyle korozyon direnci, triboloji, sertlik ve aşınma direnci gibi özelliklerde gelişme sağlanmaktadır. Kaplama böylece hem metal veya alaşımların hem de disperse edilmiş parçacıkların özelliklerine sahip olmaktadır ve elektrodepolama yoluyla elde edilen metal matrisli kompozit olarak kabul edilmektedir [4]. Elektro-eşdepolama metodu, hızlı olması, düşük maliyeti, kolay üretilebilirliği, daha kompakt yapılar elde edilmesi, yüksek saflığı, üretim parametrelerinin geniş bir aralıkta kontrol edilebilmesi, ısıtılma işlemi gerek olmaması, tekrar üretilebilmesi gibi özelliklerinden dolayı kompozit kaplamaları üretmek için tercih edilen bir metottur [5].

Ni-B kaplamalar yüksek sertlik, yüksek aşınma direnci (sert krom kaplamalardan daha iyi) ve iyi anti korozyon özelliklerine sahiptir. Ayrıca, Ni-B kaplamalar maliyet etkinliği, kalınlık üniformluğu, kayganlık, iyi tokluk, mükemmel lehimlenebilirlik, iyi elektriksel özellikler, antibakteriyel özellikler, olağanüstü elektromanyetik özellikler, düşük porozite ve yüksek yapışma gibi özelliklerle de bilinmektedir. Ni-B

kaplamalar otomotiv, uzay, nükleer, petrokimya, bilgisayar, elektronik, plastik, optik, tekstil, kâğıt, gıda ve matbaa endüstrilerinde kullanılmaktadır [6]. Ni-B alaşım kaplamalarla ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır [7-9]. Hegzagonal bor nitrür (hBN) seramik parçacıkları kompozit kaplamalar elde etmek için takviye fazı olarak kullanılabilen bir malzemedir. hBN yüksek termal iletkenlik, düşük termal genleşme, iyi termal şok direnci, yüksek elektriksel direnç, düşük dielektrik sabiti, zehirli olmayan, kolay işlenebilir, aşındırıcı olmayan, kaygan, kimyasal olarak inert, anti-korozyon ve pek çok metal tarafından ısıtılmama gibi özelliklere sahip bir inorganik malzemedir [10]. Literatürde hBN'in takviye fazı olarak kullanıldığı elektrodepolanmış kaplama çalışmalarından bazılarında Ni-W/hBN [11], Ni-Fe/hBN [12], Co-hBN [13-15], Ni-hBN [16,17], Ni-hBN-B₄C [18,19] örnek olarak verilebilir. Ayrıca Ni-B alaşım kaplamaların ana yapı (matris) malzemesi olarak kullanımıyla ilgili çalışmalarda yapılmıştır. Bu çalışmalarda bazıları Al₂O₃ [20], SiC [21], TiO₂ [22], ZrO₂ [23], Si₃N₄ [24], elmas [1] ve CeO₂ [25], parçacıkları ile takviye edilmiş kompozit kaplamalardır.

Bu çalışmada, Ni, Ni-B alaşım ve Ni-B/hBN kompozit kaplamalar elektrokimyasal kaplama metodu ile üretilmiştir. Banyoya eklenen bileşenlerin miktarları sabit tutulmuş ve elde edilen kaplamaların özellikleri üzerine olan etkileri ayrı ayrı incelenmiştir.

2. DENEYSEL (EXPERIMENTAL)

Ni kaplama, Ni-B alaşım kaplama ve Ni-B/hBN kompozit kaplamalar St-37 çelik altlık üzerine, Watts tipi nikel banyosunda elektro-kimyasal kaplama metodu ile depolanmıştır. Bütün elektrokimyasal deneyler Parstat 2273A model elektrokimyasal analiz cihazıyla gerçekleştirilmiş ve geleneksel üç elektrotlu sistem kullanılmıştır. Anot olarak platin tel, katot olarak ise 4 cm² alana sahip St-37 çelik plaka kullanılmıştır. Referans elektrot olarak ise doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Anot ve katot kaplama banyosu içinde paralel olarak yerleştirilmiştir. Depolama işlemi yapılmadan önce çelik altlıklar, yüzeyindeki yağ ve kir tabakalarının temizlenmesi amacıyla önce 600, 1200 ve 2400 zımpara kâğıdı ile aşamalı biçimde mekanik olarak zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra altlık önce aseton ile temizlenip saf su ile durulanmış ve daha sonra alkalın çözeltisi ile

tekrar temizlenmiş ve saf su ile tekrar durulanmıştır. Daha sonra %20 HCl asit çözeltisinde 1-2 dakika dağlanmış ve sonra saf su ile durulanmış ve depolama işlemine hazır hale getirilmiştir. Banyo bileşenleri ve depolama şartları Tablo 1'de verilmiştir. Banyoda nikel sülfat ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ve nikel klorit klorür ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) nikel kaynağı olarak, trimetilamin boran kompleksi (TMAB) bor kaynağı olarak, hBN takviye elemanı olarak ve sakkarin ile SDS (sodyum dodesil sülfat) ise surfaktant olarak kullanılmıştır. SDS ve sakkarin gibi katkıları saf nikel kaplama ve Ni-B alaşım kaplama üretiminde banyoya eklenmemiştir, sadece kompozit kaplama üretilirken hBN parçacıklarının elektrolit içinde süspansiyon edilebilmesi ve topaklanmaları önlemek için kullanılmıştır. Ayrıca hBN eklenmiş banyo depolama yapılmadan hemen önce homojen bir karışım elde etmek ve olası topaklanmaları önleyerek parçacık tane boyutunu azaltmak amacıyla 30 dk ultrasonik olarak çalkalanmıştır. hBN parçacıklarının ortalama toz boyutu 1 μm 'dir. Kaplama depolanma süresi 60 dk olarak ayarlanmıştır ve depolama boyunca sıcaklık $43 \pm 1^\circ\text{C}$ 'de tutulmuştur. Ayrıca depolama esnasında banyo manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır.

Tablo 1. Banyo bileşenleri ve operasyon parametreleri (Bath components and operation parameters)

Kimyasallar/Parametreler	
$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Nikel sülfat)	240 g/l
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Nikel klorit)	45 g/l
H_3BO_3 (Borik asit)	30 g/l
Trimetilamin boran kompleksi (TMAB)	3 g/l
hBN tozu	10 g/l
Sodyum dodesil sülfat (SDS)	0.5 g/l
Sakarin	2 g/l
Akım yoğunluğu	50 mA/cm^2
pH	4
Sıcaklık	$43 \pm 1^\circ\text{C}$
Süre	60 dk
Banyo karıştırma hızı	200-600 rpm
Depolama öncesi ultrasonik karıştırma	30 dk

Sırasıyla önce $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ kullanılarak saf nikel kaplama üretilmiş, daha sonra banyoya trimetilamin boran kompleksi (TMAB) eklenerek Ni-B alaşım kaplama üretilmiş ve en son olarak ta banyoya hBN parçacıkları ilave edilerek Ni-B/hBN kompozit kaplama üretilmiştir.

Bunun yanında Ni-B/hBN kaplama banyosuna eklenen sodyum dodesil sülfat ve sakarin gibi katkıları ile depolama öncesi ultrasonik karıştırma işleminin etkileri de irdelenmiştir. Banyonun pH değeri HCl ve NaOH kullanılarak 4 olarak ayarlanmıştır. Bütün depolama işlemlerinde akım yoğunluğu değeri sabit tutulmuş ve $50 \text{ mA}/\text{cm}^2$ olarak uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan bütün kimyasallar yüksek saflıktadır ve hazırlanan çözeltilerde saf su kullanılmıştır. Depolama sonrasında üretilen filmler saf su ile yıkanmış ve oda sıcaklığında kurutulmuştur.

Depolama banyosuna eklenen her bir bileşenin etkileri araştırıldığı için kolaylık olması açısından her numuneye ayrı bir isim verilmiştir. Bu isimler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Banyo bileşenlerine göre numune isimleri (Sample names according to bath components)

Banyo bileşenleri	Numune ismi
$\text{NiSO}_4 + \text{NiCl}_2$ (saf nikel kaplama)	A1
$\text{NiSO}_4 + \text{NiCl}_2 + \text{TMAB}$ (Ni-B alaşım kaplama)	A2
$\text{NiSO}_4 + \text{NiCl}_2 + \text{TMAB} + \text{hBN}$ (Ni-B/hBN kompozit kaplama)	A3
$\text{NiSO}_4 + \text{NiCl}_2 + \text{TMAB} + \text{hBN} + \text{SDS}$ ve Sakarin (Ni-B/hBN kompozit kaplama)	A4
$\text{NiSO}_4 + \text{NiCl}_2 + \text{TMAB} + \text{hBN} + \text{SDS}$ ve Sakarin (Ni-B/hBN kompozit kaplama, ultrasonik karıştırılmış banyo)	A5

Üretilen kompozit filmlerin elektrokimyasal davranışları dönüşümlü voltmetri tekniği (CV) ile değerlendirilmiştir. CV deneyleri yeni hazırlanmış elektrolitte yapılmış ve tarama hızı 10 mV/s seçilmiştir. Tarama 1.5 V ile -1.5 V aralığında gerçekleştirilmiştir. Potansiyel değerleri SCE referans elektrota karşı ölçülmüştür. Elde edilen numunelerin yüzey morfolojileri SEM (ZEISS, SUPRA-55) ile incelenmiş ve filmlerin kimyasal içerikleri enerji dispersiv X-ray spektrometre (EDS) ile belirlenmiştir. Kaplamaların kristalografik yapısal analizi Rigaku marka X-ray difraktometre kullanılarak yapılmıştır. XRD cihazı $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) 30kV potansiyel ve 30mA akım değerlerinde çalışmaktadır.

Numunelerin ortalama kristal tane büyüklüğü (D) XRD desenlerinden elde edilen FWHM değerlerinden (β) Debye-Scherrer denklemi [26] kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D = \frac{0.94\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (1)$$

λ X-ray ışınının dalgaboyu, θ değerlendirilen pikin Bragg yansıma açısı, β ise FWHM radyan cinsinden değeridir.

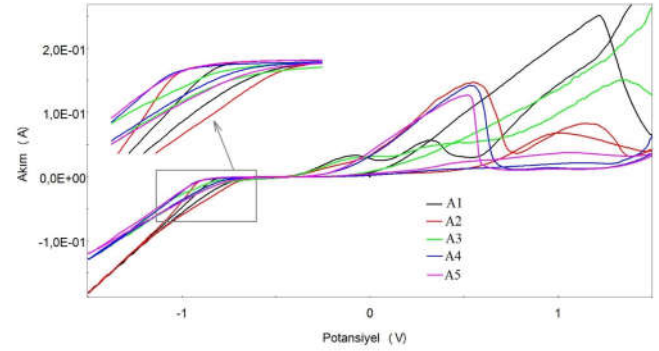
Üretilen kaplamaların korozyon performansları ölçülürken açık devre potansiyeli ölçümü ve potansiyodinamik polarizasyon eğrisi yöntemleri kullanılmıştır. Her iki testte %3,5'lük NaCl çözeltisinde gerçekleştirilmiştir. Tafel ekstrapolasyon yöntemi korozyon akım yoğunluğunu, korozyon potansiyelini ve korozyon oranını (rate) belirlemek için kullanılmıştır ve açık devre potansiyelinin (OCP) ± 250 mV civarında ve 0.166 mV/s tarama hızında elde edilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Depolama Banyolarının Elektrokimyasal Davranışları (Electrochemical Behavior of Deposition Baths)

Depolama banyosuna eklenen bileşenlerin elektrokimyasal etkilerini incelemek için dönüşümlü voltametri (CV) çalışmaları yapılmıştır. Şekil 1'de tüm numunelerin CV grafikleri bir arada verilmiştir. Katodik tarama yönü incelendiğinde -0.7 V civarlarına kadar herhangi bir akım geçişi görülmemektedir, bu da bize bu aralıkta depolanma olmadığını göstermektedir. Saf nikel kaplamayı temsil eden A1 numunesinin banyosunun CV eğrisi incelendiğinde -0.8 V civarlarında ani akım artışıyla depolanmanın başladığı görülmektedir. Banyoya bor kaynağı olan TMAB'ın eklenmesiyle elde edilen A2 numunesinin banyosunda, depolanma başlama potansiyelinin bir miktar negatif tarafa kaydığı ve -0.9 V civarlarında katodik akım geçişinin başladığı görülmektedir. Depolanma akım yoğunluğu açısından baktığımızda ise A1 ve A2 numunelerin banyolarının aynı olduğu görülmektedir. Takviye olarak kullanılan hBN parçacıklarının eklenmesiyle elde edilen A3 isimli numunenin banyosunda depolanma başlama potansiyeli pozitif tarafa kaymıştır ve -0.7 V civarlarındadır. Daha sonra banyoya SDS ve sakarin gibi katkıların eklenmesiyle birlikte (A4 numunesi) depolanma başlangıç potansiyeli tekrar negatif tarafa kaymış ve -0.9 V civarında ölçülmüştür. Ultrasonik karıştırma işlemi uygulanmış A5 numunesinin banyosunda ise depolanma başlangıç potansiyeli A4 ile aynıdır. Banyoya hBN parçacıklarının eklenmesiyle birlikte katodik akım yoğunluğunda belirgin bir azalma gözlenmektedir. Katodik akım

yoğunluğunda azalma depolanan metal veya alaşım miktarında da azalmaya işaret etmektedir. Metal ve alaşımlarla birlikte depolanan hBN parçacıkları, kendileri de belirli bir hacim kapladığından toplamda depolanan metal ya da alaşım miktarında azalmaya neden olabilmektedir. hBN parçacıkları iletken olmadıkları için depolanma esnasında akım geçişine neden olmamaktadırlar. Banyoya eklenen katkı ve ultrasonik karıştırma işlemi depolanma akım yoğunluğunu çok fazla etkilememiştir. Anodik tarama yönünü incelediğimizde A1 isimli numunenin banyosunda -0.1 V ve 0.3 V civarlarında iki adet çözünme piki görülürken, A2 numunesinin banyosunda 0.55 V civarların da daha geniş ve yüksek tek bir çözünme piki görülmektedir. A3 numunesinin banyosunda yine 2 adet çözünme piki bulunmakta fakat farklı potansiyel değerlerinde görülmektedir (-0.1 V ve 0.4 V). A4 ve A5 numunesinde ise tek çözünme piki vardır ve birbirine çok benzer durumdadır. Potansiyel değeri pozitif tarafa kaymıştır ve 0.5 V civarlarındadır ve A3'e göre pikler daha yüksektir.



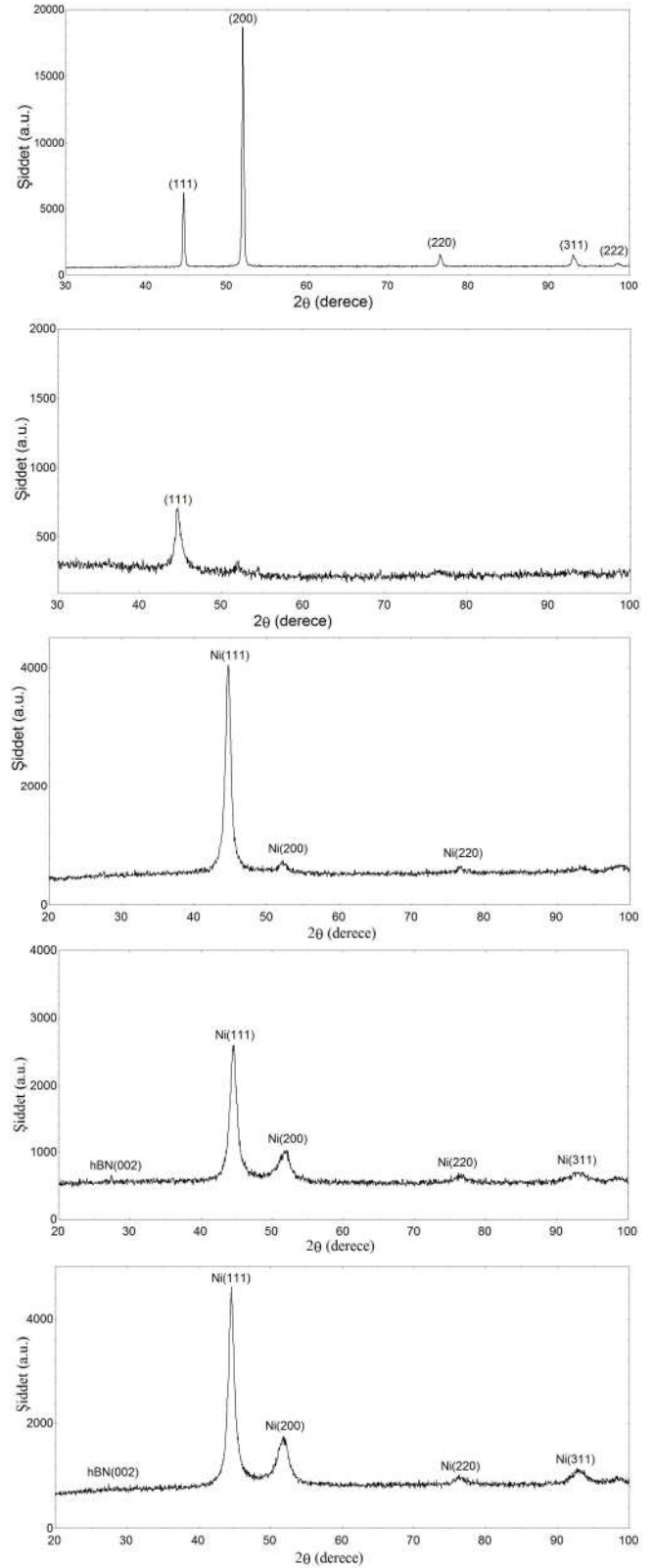
Şekil 1. Depolama banyolarının CV grafikleri (CV graphs of deposition baths)

Ni-B alaşımının elektro-kimyasal olarak depolanmasında, bor atomları banyoda kullanılan bor kaynağından direk olarak indirgenerek alaşım halinde depolanmamaktadır. Bor atomlarının depolanma mekanizması tam olarak anlaşılabilmiş olmasa da, indüklenmiş eş-depolanma mekanizması adı verilen bir mekanizma ile depolandığı düşünülmektedir. Bu mekanizmada sulu çözeltilerde doğrudan depolanmak yerine, başka bir metalin depolanması esnasında, onunla birlikte alaşım olarak eş-depolanması söz konusudur. Nikelin bu şekilde fosfor, tungsten ve molibden gibi elementlerle alaşım halinde depolandığı bilinmektedir. İndüklenmiş eş-depolanma mekanizmasında iki metal eş zamanlı bir şekilde alaşım olarak depolanmaktadırlar, yani bu mekanizma tek bir metal iyonlarının indirgenmesinden farklı bir olaydır [1]. hBN parçacıklarının elektrodepolanmış Ni-B alaşım

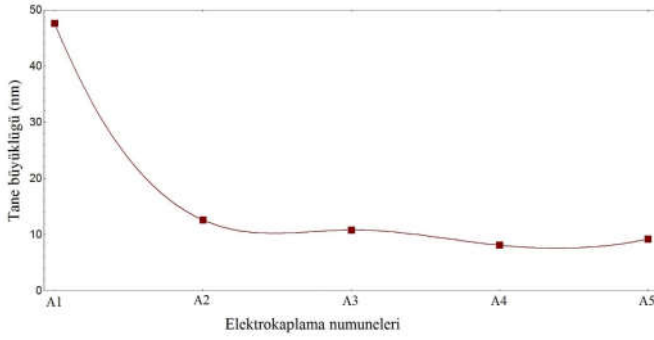
matrisiyle birlikte eşdepolanması Guglielmi modeli ile açıklanabilir. Bu modelde ilk adım, hBN parçacıklarının yüzeyine Ni iyonlarının adsorblanmasıdır. İkinci adım ise iyonik bulutlarıyla birlikte hBN parçacıklarının difüzyon tabakası boyunca katoda doğru difüze olmasıdır. Daha sonra katot yüzeyinde hBN parçacıklarının gevşek adsorbsiyonu gerçekleşir. Ni iyonları katot yüzeyinde yüklerini boşalttıklarında ise hBN parçacıkları biriken metal içerisinde hapsedilir ve sonunda Ni-B matris içerisinde eşdepolanmış olur [25].

3.2. Yapısal ve Morfolojik Analiz (Structural and Morphological Analysis)

Şekil 2’de üretilen kaplamaların XRD desenleri verilmiştir. A1 numunesinin XRD deseni incelendiğinde saf nikelin özgül kırınım pikleri görülmektedir. Kırınım deseninde 51.91 derecede (200) ana ve en şiddetli pik olmak üzere, bu pike (111), (220), (311) ve (222) pikleri eşlik etmektedir. Tipik saf nikel kaplamada [100] kristal büyüme düzlemi, (200) piki ile temsil edilmektedir [27]. Elektrodepolanmış nikel filmlerin tercihli yönelimleri, pH ve elektroliz potansiyeli gibi kaplama koşullarına güçlü bir şekilde bağlıdır, çünkü nikel matrisi içinde hidrojen eşdepolanması kristal yapı değişiminden kısmen sorumludur [7,28]. A2 isimli Ni-B alaşımına ait numunenin XRD desenini incelediğimizde, saf nikelin (111) piki hariç diğer piklerin tamamen kaybolduğu gözlenmektedir. (111) kırınım pikinin şiddeti de oldukça azalmıştır. Banyoya TMAB’ın eklenmesi kristal yapıyı çok ciddi derecede etkilemiştir. Nikelle birlikte depolanmış bor atomları kristalli olan yapıyı amorf ya da nanokristalli bir yapıya dönüştürmüştür. Banyoya hBN parçacıklarının eklenmesiyle elde edilen A3 isimli Ni-B/hBN kompozit kaplamasının XRD deseninde (111) pikinin şiddeti biraz artmış ve nikelin diğer piklerde tekrar görünür hale gelmiştir. Ama (111) piki A1 numunesinden farklı olarak en şiddetli pik olarak görünmektedir. A4 ve A5 numunelerinde SDS, sakarin ve ultrasonik karıştırmanın etkisiyle hBN parçacıkların elektrolit içinde süspansiyon edilmesi ve topraklanmalarının azalmasıyla nikelin özgül piklerin şiddetlerinin arttığı ve 26.64 derecede zayıfta olsa (002) hBN ana pikinin ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 2. Kaplamaların XRD grafikleri, yukarıdan aşağıya sırasıyla A1, A2, A3, A4 ve A5 (XRD patterns of the coatings, from top to bottom A1, A2, A3, A4 and A5, respectively)



Şekil 3. Kaplamaların kristal tane büyüklüğü (Average crystallite size of the coatings)

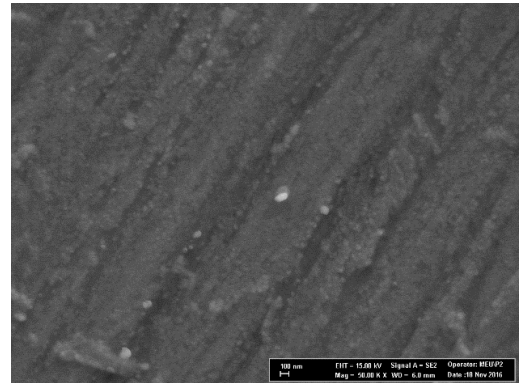
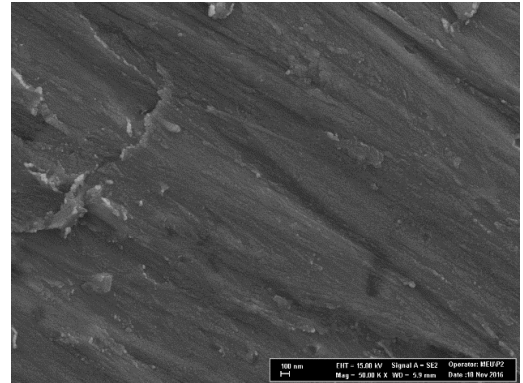
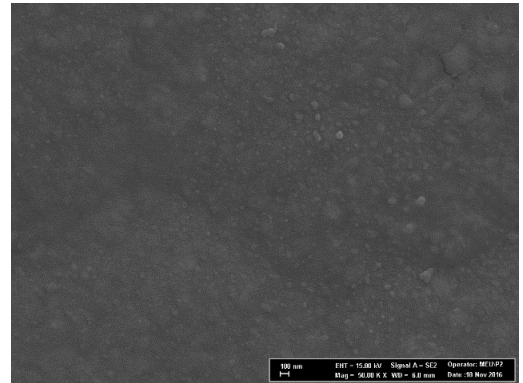
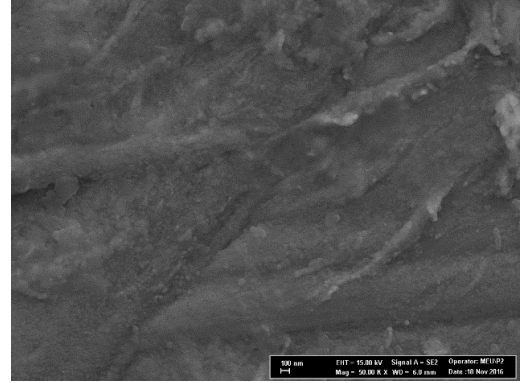
XRD desenlerinden elde edilen ortalama kristal tane büyüklükleri Şekil 3'te grafik olarak verilmiştir. Tablo 3'te ise XRD desenlerinden hesaplanan tüm parametreler özet olarak sunulmuştur. A1 isimli saf nikel kaplamanın kristal tane büyüklüğü 47.6 nm olarak hesaplanırken, yapıya bor elementinin dahil olduğu A2 isimli Ni-B alaşım kaplamasında kristal tane büyüklüğü 12.6 nm hesaplanmıştır. Banyoya TMAB eklenmesi tane büyüklüğünde çok ciddi derecede azalmaya sebep olmuştur. Banyoya hBN parçacıklarının eklenmesiyle elde edilen kompozit kaplamalarda (A3, A4, A4) tane büyüklüğünün bir miktar daha azaldığı görülmektedir. Banyoya eklenen SDS ve sakarin tane büyüklüğünü azaltıcı etkiye sahipken, ultrasonik karıştırma işlemi ise tane büyüklüğünün bir miktar tekrardan yükselmesine neden olmuştur.

Tablo 3. XRD grafiklerinden elde edilen parametreler (Parameters obtained from XRD patterns)

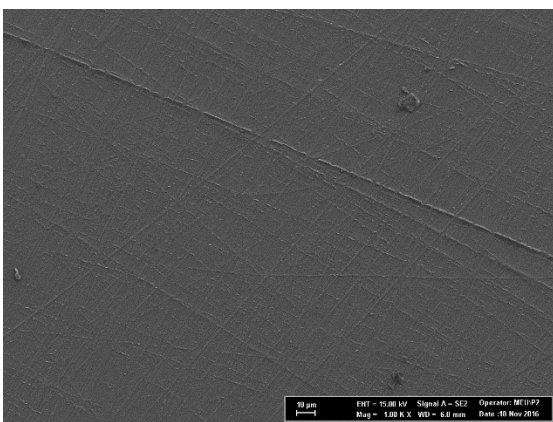
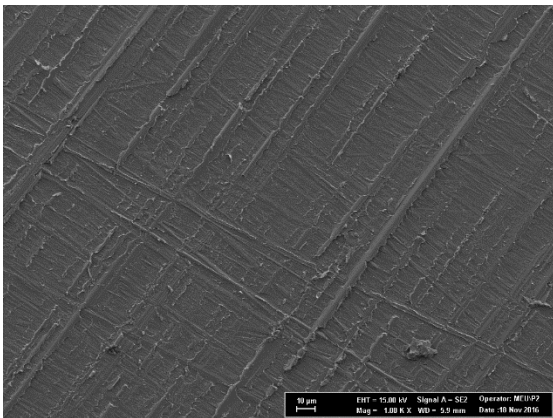
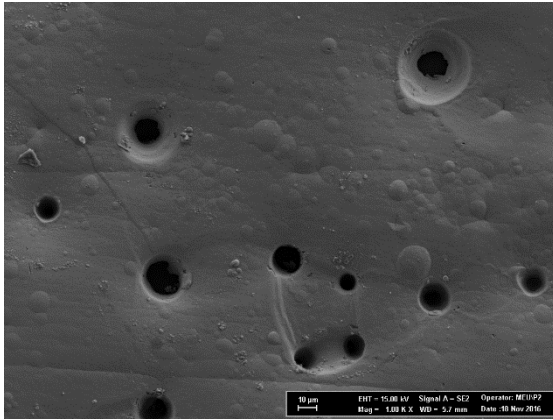
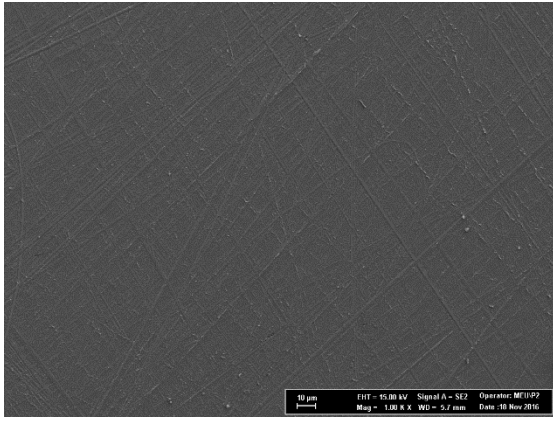
Numune	2θ (derece)	d(Å)	FWHM	Tane büyüklüğü (nm)	(hkl)	Latis (a)
A1	51,91	1,76	0,194	47,6	(200)	3,520 (a)
A2	44,53	2,03	0,71	12,6	(111)	3,521 (a)
A3	44,6	2,03	0,827	10,8	(111)	3,512 (a)
A4	44,57	2,03	1,103	8,1	(111)	3,522 (a)
A5	44,50	2,03	0,970	9,2	(111)	3,524 (a)

Şekil 4 ve 5'te farklı büyütme oranlarında numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde A2 numunesinin diğerlerine göre daha düzgün bir yüzeye sahip olduğu görülmektedir. Fakat bu numune üzerinde akım yoğunluğunun biraz yüksek olmasından dolayı çeşitli büyüklüklerde çukurlar oluşmuştur. Ni-B alaşım kaplamalarda akım yoğunluğunu azaltığımızda bu çukurlar oluşmamaktadır. A1, A4 ve A5 numunelerinin yüzey yapıları genel olarak birbirine benzer görünmektedir. Ama A4

numunesi diğerlerinden bir miktar daha pürüzlü bir yüzeye sahiptir. Bu duruma hBN parçacıklarının toplanmalarının sebep olduğunu söyleyebiliriz. Ultrasonik karıştırma işlemi toplanmaları büyük oranda azalttığı için yüzey yapısı daha düzgün görünmektedir.



Şekil 4. Numunelerin 50000X büyütmedeki SEM görüntüleri, yukarıdan aşağıya sırasıyla A1, A2, A4 ve A5 (SEM images of the coatings, from top to bottom A1, A2, A4 and A5, respectively)



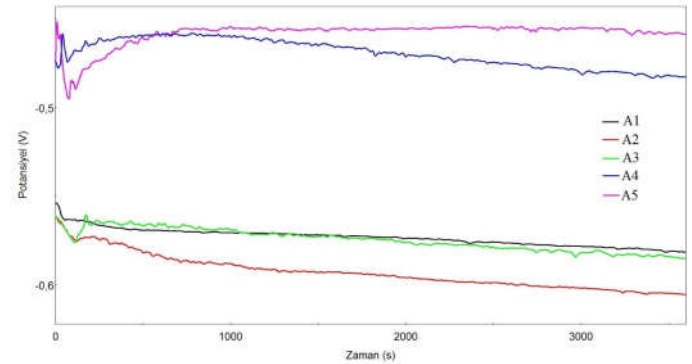
Şekil 5. Numunelerin 1000X büyütmedeki SEM görüntüleri yukarıdan aşağıya sırasıyla A1, A2, A4 ve A5 (SEM images of the coatings, from top to bottom A1, A2, A4 and A5, respectively)

Tablo 4. Numunelerin EDS kimyasal içerik analiz sonuçları (EDS results of samples)

Numune	Nikel % ağı.	Bor % ağı.	Azot % ağı.
A2	88.15	11.84	-
A4	85.75	13.29	0.95
A5	84.73	14.12	1.14

Tablo 4'te numunelerin EDS analiz sonuçları verilmiştir. Numuneyi en iyi temsil eden kısımlardan içerik analizleri yapılmaya çalışılmıştır ve birden fazla bölgeden içerik analizleri yapılmış ve tutarlı sonuçlar grafiklerde kullanılmıştır. EDS analizlerinde nikelin yanı sıra bor ve azot elementleri de görülmektedir. Fakat bor elementi hem alaşım olarak kullanılan bir element, hem de hBN parçacıklarında bileşiği oluşturan bir element olduğu için azota göre daha yüksek oranlarda görülmektedir. Ayrıca bu durumda kompozit kaplamada eşdepolanan hBN parçacık miktarını ancak azot miktarından yorumlayabiliriz. A5 numunesinde azot miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu durum ultrasonik karıştırma işleminin hBN parçacıklarının depolanma miktarının artmasına katkı sağladığını göstermektedir.

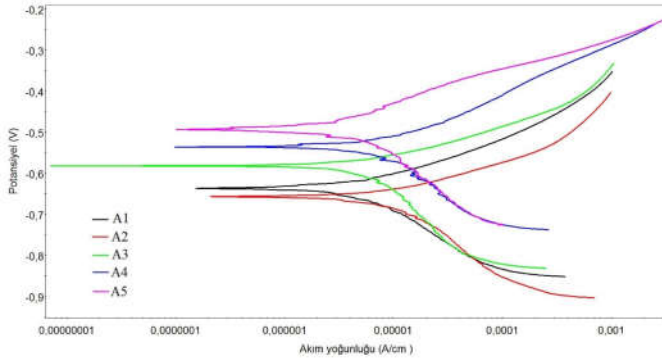
3.3 Korozyon çalışmaları (Corrosion studies)



Şekil 6. Numunelerin açık devre potansiyel eğrileri (OCP) (OCP curves of samples)

Şekil 6'da kaplamaların açık devre potansiyel eğrileri bir arada verilmiştir. Banyoya TMAB eklendiğinde elde edilen A2 numunesi için açık devre potansiyelinin bir miktar negatif tarafa kaydığı görülmektedir. Bu durumda saf nikel kaplamaya göre Ni-B alaşımının korozyon dayanımının azaldığını söyleyebiliriz. Banyoya hBN parçacıkları eklenmesiyle elde edilen A3 isimli kompozit kaplamada açık devre potansiyeli tekrar pozitif tarafa kaymıştır. Bu durum yapıya bor elementinin eklenmesiyle azalan korozyon dayanımının, hBN parçacıkları takviyesiyle tekrar

güçlenmeye başladığını göstermektedir. Özellikle SDS ve sakarin gibi katkıları ile ultrasonik karıştırma işlemi sonucunda kaplamadaki artan hBN miktarı ile birlikte açık devre potansiyeli ciddi miktarda pozitif tarafa kaymıştır.



Şekil 7. Numunelerin Tafel eğrileri (Tafel curves of samples)

Şekil 7’de verilen Tafel eğrileri ve bu eğrilerden elde edilen korozyon verileri (Tablo 5) incelendiğinde, nikelin bor ile alaşımının korozyon dayanımı açısından kötü bir etkiye sahip olduğu, Ni-B alaşımının hBN parçacıkları ile takviye edilmesinin ise korozyon dayanımı açısından oldukça olumlu bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. Özellikle hBN parçacık eşdepolanma miktarını artıracak katkı maddeleri ve ultrasonik karıştırma işlemi sayesinde korozyon dayanımında çok yüksek gelişme sağlanmaktadır. A5 isimli numunenin korozyon akımı ve korozyon hızı diğer numunelerden oldukça iyi durumdadır. Bu duruma ultrasonik işlemin topaklanmaları ciddi oranda azaltması ve hBN depolanma miktarını artırmasının sebep olduğunu söyleyebiliriz. Korozyon dayanımındaki bu gelişme, kompozit kaplamanın yüzeyi üzerindeki çatlakların, boşlukların ve mikron boyutunda deliklerin doldurularak korozyon prosesi için hBN parçacıkları tarafından fiziksel bariyer üretilmesinden kaynaklanabilir [28]. Korozyon dayanımının artmasıyla ilgili diğer bir görüş ise elektrokaplama işlemi esnasında tanecik sınırlarında iyi bir şekilde dağılım gösteren takviye parçacıkları, kaplamadaki kusurları azaltmaktadırlar ve kaplamayı daha kompakt ve daha az geçirgen hale getirmektedirler. Bu durum ise korozyon dayanımında artışa sebep olmaktadır [22].

Tablo 5. Numunelerin Tafel parametreleri (Tafel parameters of samples)

Numune	E_{kor} (mV)	I_{kor} (μ A/cm ²)	Korozyon hızı (mpy)
A1	-637	7,956	0,01480
A2	-657	17,41	0,03239
A3	-582	11,36	0,02113
A4	-535	10,53	0,01958
A5	-492	2,446	0,004551

4. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Elektrokimyasal kaplama metodu ile saf Ni, Ni-B alaşım ve Ni-B/hBN kompozit kaplamalar üretilmiş ve elektrolitte kullanılan bileşenlerin miktarları sabit tutularak kaplamanın özelliklerine etkileri incelenmiştir. Eklenen her bileşenin kaplama özelliklerini ciddi derecede etkilediği belirlenmiştir. Banyoya TMAB eklenmesi kristal yapıyı çok ince taneli hale getirmiş ve korozyon dayanımını düşürmüştür. hBN takviyesi ise özellikle korozyon dayanımının artmasına çok büyük katkı sağlamıştır. Bunun yanında hBN depolanma miktarını artıran SDS ve sakarin gibi katkı maddeleri ile ultrasonik karıştırma işleminin olumlu etkileri olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Mustafa Kemal Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından desteklenmiştir (MKU-BAP-15438).

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] H. Ogihara, M. Safuan, T. Saji, Effect of electrodeposition conditions on hardness of Ni-B/diamond composite films, *Surface&Coatings Technology*, 212: 180-184, 2012.
- [2] N. Kanani, Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice, *Elsevier Advanced Technology*, Oxford, U.K., 2004.
- [3] K.E. Hou, Y.C. Chen, Preparation and wear resistance of pulse electrodeposited Ni-W/Al₂O₃ composite coatings, *Applied Surface Science*, 257: 6340-6346, 2011.
- [4] L. Benea, Electrodeposition and tribocorrosion behaviour of ZrO₂-Ni composite coatings, *J. Appl. Electrochem.*, 39:1671-1681, 2009.

- [5] C.C. Koch, Structural nanocrystalline materials: an overview, *j. Mater. Sci.*, 42: 1403, 2007.
- [6] R.A. Shakoor, R. Kahraman, U.S. Waware, Y. Wang, W. Gao, Synthesis and Properties of Electrodeposited Ni-B-Zn Ternary Alloy Coatings, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 9:5520, 2014.
- [7] H. Ogihara, K. Udagawa, T. Saji, Effect of boron content and crystalline structure on hardness in electrodeposited Ni-B alloy films, *Surface&Coatings Technology*, 206, 2933-2940, 2011.
- [8] Y. N. Bekish, S. K. Poznyak, L. S. Tsybulskaya, T. V. Gaevskaya, Electrodeposited Ni-B alloy coatings; Structure, corrosion resistance and mechanical properties, *Electrochimica Acta*, 55, 2223-2231, 2009.
- [9] K.H. Lee, D. Chang, S.C. Kwon, Properties of electrodeposited nanocrystalline Ni-B alloy films, *Electrochimica Acta*, 50, 4538-4543, 2005.
- [10] B. Ertuğ, Powder Preparation, Properties and Industrial Applications of Hexagonal Boron Nitride, *Intech*, chapter 2, 33-55, 2013.
- [11] S. Sangeetha, G. P. Kalaignan, Tribological and electrochemical corrosion behavior of Ni-W/BN (hexagonal) nano-composite coatings, *Ceramics International*, Volume 41, Issue 9, Part A, 10415-10424, 2015.
- [12] M.K. Tripathi, D.K. Singh, V.B. Singh, Electrodeposition of Ni-Fe/BN nano-composite coatings from a non-aqueous bath and their characterization, *Int. J. of Electrochemical Science*, 8, 3454-3471, 2013.
- [13] Z. Shahri, S.R. Allahkaram, Effect of particles concentration and current density on Co-hBN nanocomposite coatings properties, *Iranian Journal of Materials Science&Engineering*, vol 9, number 4, 2012.
- [14] Z. Shahri, S.R. Allahkaram, A. Zarebidaki, Electrodeposition and characterization of Co-BN(h) nanocomposite coatings, *Applied Surface Science*, 279, 174-181, 2013.
- [15] Z. Shahri, S.R. Allahkaram, Effect of plating parameters on microstructure and tribological properties of Co-BN(hexagonal) nano composite coatings, *Trans. Of Nonferrous Metals Society of China*, 23, 2929-2938, 2013.
- [16] E. Pompei, L. Magagnin, N. Lecis, P.L. Cavallotti, Electrodeposition of nikel-BN composite coatings, *Electrochimica Acta*, 54, 2571-2574, 2008.
- [17] M. Pushpavanam, S.R. Natarajan, Nickel-Boron Nitride Electrocomposites, *Metal Finishing*, 1995.
- [18] S. Paydar, A. Jafari, M.E. Bahrololoom, V. Mozafari, Enhancing Ni electroplated matrix through mixed boron nitride-carbide reinforcement, *Vacuum*, 92, 52-57, 2012.
- [19] S. Paydar, A. Jafari, M.E. Bahrololoom, V. Mozafari, Influence of BN and B₄C particulates on wear and corrosion resistance of electroplated nickel matrix composite coatings, *Tribology*, vol 9, no 2, 105-110, 2015.
- [20] R.A. Shakoor, R. Kahraman, U.S. Waware, Wang Y., Gao W., Properties of electrodeposited Ni-B-Al₂O₃ composite coatings, *Materials and Design*, 64: 127-135, 2014.
- [21] H. Ogihara, H. Wang, T. Saji, Electrodeposition of Ni-B/SiC composite films with high hardness and wear resistance, *Applied Surface Science*, 296: 108-113, 2014.
- [22] Y. Wang, S. Wang, X. Shu, W. Gao, W. Lu, B. Yan, Preparation and property of sol-enhanced Ni-B-TiO₂ nano-composite coatings, *J. of Alloys and Compounds*, 617: 472-478, 2014.
- [23] R.A. Shakoor, R. Kahraman, U.S. Waware, Y. Wang, W. Gao, Properties of Electrodeposited Ni-B-ZrO₂ Composite Coatings, *Int. J. of Electrochemical Science*, 10: 2110-2119, 2015.
- [24] K. Krishnaveni, T.S.N.S. Narayanan, S.K. Seshadri, Electrodeposited Ni-B-Si₃N₄ composite coating: Preparation and evaluation of its characteristic properties, *J.*

of Alloys and Compounds, 466: 412-420,
2008.

- [25] R.A. Shakoor, R. Kahraman, U. S. Waware, Y. Wang, W. Gao, Synthesis and properties of electrodeposited Ni-B-CeO₂ composite coatings. *Materials and Design*, 59:421-429, 2014.
- [26] A. L. Patterson, The Scherrer formula for X-ray particle size determination, *Phys. Rev.* 56 978-982, 1939.
- [27] G. Gyawali, S.W. Lee, Effect of SiC and hBN codeposition on microstructural and tribological properties of Ni-SiC-hBN composite coatings, *Ceramic Processing Research*, Vol 16, No: 2, 213-217, 2015.
- [28] M. Motoyama, Y. Fukunaka, T. Sakka, Y.H. Ogota, Effect of Surface pH on Electrodeposited Ni Films, *Journal of the Electrochemical Society*, 153, C502, 2006.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 03.08.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 21.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.332569	

Farklı elektrik direnç kaynağı parametrelerinin mukavemet üzerine etkilerinin incelenmesi

Hande Güler Özgül^{*1}, Sıddıka Arslan²

ÖZ

Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde kullanılan 5000 serisi alüminyum alaşımlarından olan Al 5754-H111 malzemesi elektrik direnç kaynak yöntemi ile farklı kaynak akımı, kaynak süresi ve sıkıştırma yükü ile birleştirilmişlerdir. Kaynak işlemi uygulanmış numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla kaynaklı bağlantılara çekme deneyi yapılmıştır. Test sonuçlarına göre elde edilen çekme mukavemeti ve çekme uzaması değerlerindeki farklılıklar, kaynak parametrelerindeki değişimin kaynağın mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: elektrik direnç kaynağı, punta kaynağı, alüminyum alaşım, çekme mukavemeti

Investigation of the effects of different electrical resistance welding parameters on strength

ABSTRACT

In this study, Al 5754-H111 material from 5000 series aluminum alloys used in the automotive industry were combined with different welding current, welding time and compression load by electrical resistance welding method. Tensile tests were performed to determine the mechanical properties of welded specimens. The differences in tensile strength and tensile elongation values obtained from the test results have shown that the variation in weld parameters has a significant effect on the mechanical properties of the weld.

Keywords: electrical resistance welding, spot welding, aluminum alloy, tensile strength

* Sorumlu Yazar/Corresponding Author

¹ Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü, handeguler@uludag.edu.tr

² s.arslan1806@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde otomotiv endüstrisinde en sık kullanılan birleştirme yöntemlerinden olan kaynak uygulaması içerisinde halen en çok kullanılan yöntem elektrik direnç kaynağıdır.

Büyük bir binek taşıtta ortalama olarak 4.000 ile 6.000 arasında elektrik direnç kaynağı uygulandığı bilinmektedir [1] ve bu durum, otomotiv endüstrisinde elektrik direnç kaynağının önemini güncel tutmayı başarmıştır.

Elektrik direnç kaynağı, basınç altında elektrotlar arasında tutulan kaynak uygulanacak parçalardan geçen elektrik akımına karşı, parçaların gösterdiği direnç yoluyla oluşan ısı ile gerçekleştirilen bir kaynak yöntemidir [2].

Bu yöntem pek çok malzeme birleştirilmesinde kullanılmakta olup başta alüminyum, titanyum ve bakır alaşımları ile yüksek/ düşük dayanımlı ve paslanmaz çeliklerde oldukça yaygındır.

Literatürde elektrik direnç kaynağı ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Çalışmalar aynı malzemelerin kaynağının yanı sıra farklı malzemelerin kaynağını da içermektedir.

Farklı malzemelerin kaynağı ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde; Demir ve ark. [3], trip ve dual fazlı çelik malzemelere direnç nokta kaynağı uygulamış ve işlem esnasında oluşan ısı etkisini mikroyapı, mekanik ve kaynak sonrası kopma yüzeyleri açısından değerlendirmiştir. Farklı malzemelerin elektrik direnç kaynağı ile ilgili bir başka çalışma Sun ve ark. [4] tarafından yapılmıştır. Çalışmada AZ31 ve AA5754 sac malzemelerin kaynak işleminde ara malzeme olarak ticari saf nikel ara tabakası yerleştirilmiş ve bu işlemin kaynak mukavemetinde önemli bir gelişme oluşturduğu sonucuna ulaşmışlardır. AA6022-T4 ve düşük karbonlu çelik sacın kaynak kırılma modları ve kayma mukavemetini farklı kaynak parametreleri için Chen ve ark. [5] incelemişlerdir. Yine Chen ve ark. [6] A5052 alüminyum ve DP 600 çelik malzemelerin elektrik direnç kaynağının optimum mekanik özelliklerinin hangi kaynak parametrelerinde gerçekleştirildiğini araştırmışlar ve ayrıca sertlik ölçümü, mikro yapı analizi, kırılma yüzeylerinin incelemesini yapmışlardır. Sun ve ark. [7] ise 16Mn yüksek mukavemetli çelik ve 6063-T6 alüminyum malzemelerin kaynak işlemiyle ilgili bir çalışma gerçekleştirmişler, yüksek kaynak mukavemeti elde edilmesi amacıyla kaynak

işleminde F tipi elektrot kullanıp, elektrotun optimize edilmesiyle ilgili araştırma yapmışlardır.

Alüminyum dışında aynı malzemelerin birbiri ile elektrik direnç kaynağı uygulanan çalışmalar incelendiğinde; Kaya ve Kahraman [8] ASTM grade 2 titanyum sacların elektrik direnç kaynaklarını farklı kaynak parametreleri için gerçekleştirmiş ve bu parametrelerin çekirdek çapı, elektrod dalma derinliği, kopma tipi, sertlik ve mikroyapı üzerine etkilerini incelemişlerdir. Aynı malzemelerin kaynağı konusunda bir başka çalışma ise Aslanlar ve ark. [9] tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kaynak zamanının kaynak mukavemeti üzerindeki etkisini galvaniz kaplanmış kromatlı mikro alaşımlı çelikler için inceleyip maksimum çekme mukavemetinin ulaşıldığı parametreyi belirlemişlerdir.

Özyürek [10] östenitik paslanmaz çeliklerin elektrik direnç kaynağını farklı kaynak parametreleri ve farklı kaynak atmosferleri açısından incelerken, magnezyum alaşımlı sacların elektrik direnç kaynağının mekanik özellikler ve mikroyapı üzerindeki etkileri Sun ve ark. [11] ve kaplamasız düşük karbonlu çelik sacların kaynak akımı, kaynak zamanı, elektrot basıncı ve tutma süresi parametrelerinde kaynak statik mukavemeti ve kaynak kopma tipinin belirlenmesi ve kopma modunun tahmini için analitik model oluşturulması Pouranvari ve ark. [12] tarafından gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum malzemelerin birbiri ile gerçekleştirilen elektrik direnç kaynağı ile ilgili de literatürde çalışmalar bulunmaktadır.

Florea ve ark. [13], 6061-T6 alüminyum malzemenin farklı kaynak koşulları için optimum nihai ürün sonucu elde etmeyi amaçlamışlardır. Yüksek kaynak akımı uygulandığında, kaynak izlerinin de buna bağlı olarak daha derine ineceği sonucuna varmışlardır.

Yine alüminyum alaşımlı malzeme ile ilgili bir başka çalışma Hassanifard ve Zehsaz [14] tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, elektrik direnç kaynağının sonlu elemanlar simülasyonu gerçekleştirilmiş ve yorulma ömrü tahmini yapılmıştır. Nümerik sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılıp, çekirdek bölgesindeki artık gerilmelerin artan elektrot sıkıştırma kuvveti ile azaldığı ve çekirdek etrafında büyük çekme gerilmelerinin oluştuğu sonucuna varılmıştır.

Bir başka çalışmada ise, alüminyum alaşım 6082-T6 malzemenin elektrik direnç kaynağı farklı kaynak parametreleri için Pereira ve ark. [15]

tarafından gerçekleştirilmiş, kaynak akımı ve süresindeki artışın kaynak mukavemeti ve birleşme boyutunun artırdığını tespit etmişlerdir.

Wu ve ark. [16], 2 mm kalınlığındaki AA6111-T4 alüminyum alaşımlı malzemenin kendi içerisinde direnç nokta kaynağını gerçekleştirip, kopma davranışı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırırken, kaynak mikro yapısının lokal olarak incelemesini gerçekleştirip kopmayı nasıl etkilediğini belirtmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen çalışmaların dışında, Al 5754 malzemesinin kendisi ile elektrik direnç kaynağı uygulaması hakkında literatürde araştırması yapılmış ve Han ve ark.[17] nın, 1 mm ile 2,5 mm arasındaki sac kalınlıkları için, ana metal kalınlığı ve kaynak yığınının yönelimlerinin, kaynak kalitesi ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelediği ve farklı test geometrilerinde kopma davranışlarını araştırdıkları, Senkara ve Zhang [18] ın, 1,6 ve 2 mm kalınlığındaki elektrik direnç kaynağı yapılmış Al 5754 sacların kaynak işlemi sonucu oluşabilecek kırılma davranışı üzerine bir çalışma gerçekleştirip, önemli bir veri olan çekirdekten gelen basınçlı sıvı malzemenin kaynak esnasında oluşan çatlağı yayıp şekillendirebileceği ve Long ve Khanna [19] nın ise 2 mm kalınlığındaki Al 5754 malzemenin elektrik direnç kaynağı sonucu oluşan artık gerilmenin iki boyutlu sonlu elemanlar simülasyonunu gerçekleştirip, çekirdek merkezinde maksimum ve kenarlarında ise minimum çekme gerilmesinin oluştuğunu tespit ettikleri sonucuna ulaşılmıştır.

Bu çalışmada ise 1mm kalınlığındaki AA5754-H111 alüminyum alaşımlı malzeme kullanılmıştır. AA5754-H111 alüminyum alaşımı malzemenin seçilme nedeni, bu malzemenin farklı sanayi alanlarında ve özellikle otomotiv sanayinde kullanılmasıdır. AA5754-H111 alüminyum alaşımı levhalara elektrik direnç kaynağı uygulanmıştır ve levhaların kaynak uygulaması sonucu mekanik özelliklerinin değişimi araştırılmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneysel çalışmada kullanılan AA5754-H111 alüminyumun kimyasal bileşimi Tablo 1'de, mekanik özellikleri ise Tablo 2'de verilmiştir.

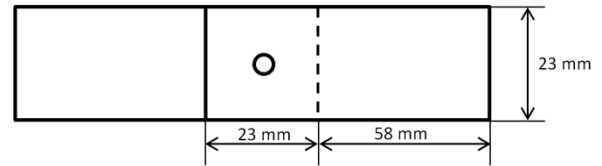
Tablo1. Deneysel kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi (The chemical composition of material used in the experiments)

Kim. Bil.	Mg	Fe	Mn	Si	Zn	Cr	Cu	Ti	Al
(%)	2,834	0,251	0,190	0,071	0,05	0,02	0,022	0,003	Kal.

Tablo2. Deneysel kullanılan malzemenin mekanik özellikleri (The mechanical properties of material used in the experiments)

Mekanik Özellikler	Akma Mukavemeti	Çekme Mukavemeti	Uzama
	117 MPa	207 MPa	%21

Kaynakla birleştirilecek olan 1 mm kalınlığındaki deney numuneleri 55x22 mm boyutlarında kesilmiş ve daha sonra kenarlarında oluşabilecek çentik etkisinin önlemek amacıyla numunelerin çapakları alınmıştır. Mekanik özellikleri incelenmek üzere elektrik direnç kaynağı yöntemine tabi tutulan alüminyum alaşımın boyutları ve kaynak bağlantı şekilleri Şekil 1. de gösterildiği gibidir. Birbiri üzerine bindirme yapılan kısmın tam ortasına elektrik direnç kaynağı uygulanmıştır.



Şekil 1. Deney numunesi boyutları (Test sample dimensions)

Alüminyum levhaları birbirine bağlamak amacıyla Şekil 2 de gösterilen 125 KVA güce sahip nokta direnç kaynak makinesi kullanılmıştır. Numunelere; 2 farklı akım değeri (11 kA ve 14 kA), 2 farklı çevrim süresi (4 ve 6 çevrim) ve 3 farklı sıkıştırma yükü (400 kg, 300 kg ve 180 kg) uygulanarak kaynak işlemi gerçekleştirilmiştir.



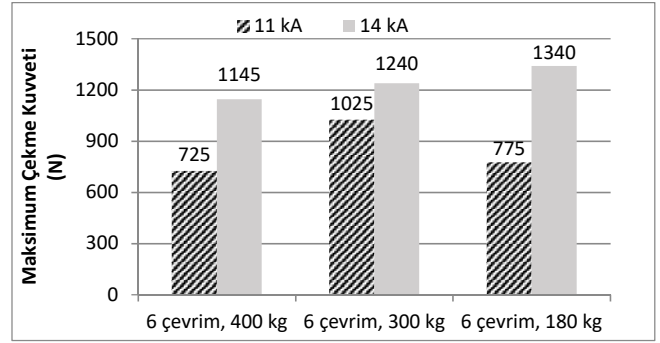
Şekil 2. Elektrik direnç kaynağı makinesi.(Electrical resistance welding machine)

Kaynak işlemi gerçekleştirilen numunelerin dayanımlarını elde etmek amacıyla çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme işlemine tabi tutulan malzemelerde kullanılan çekme hızı 2 mm/ dk. ve kullanılan yük hücresi ise 250 kN dur.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

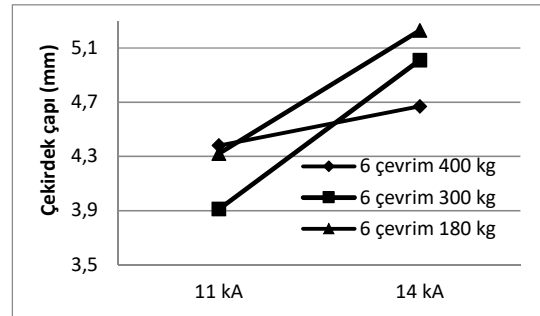
Bu çalışmada farklı elektrik direnç kaynağı parametrelerinin, kaynak bağlantısının mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla belirlenen kaynak zamanı, kaynak akımı ve sıkıştırma yükü değerleri için elektrik direnç kaynağı yapılmıştır.

Çalışmada kaynak süresi ilk olarak 6 çevrim seçilmiştir ve 2 farklı kaynak akımı (11kA ve 14 kA) ve 3 farklı sıkıştırma yükü (400 kg, 300 kg, 180 kg) için maksimum çekme yükü ve çekme uzaması değerleri elde edilmiştir. Şekil 3 te bu parametrelere bağlı olarak elde edilen maksimum çekme kuvveti değerleri görülmektedir. Buna göre aynı çevrim ve aynı sıkıştırma yükleri için kaynak akımı 11kA den 14 kA' e artırıldığında, kaynaklı parçaların maksimum çekme kuvveti de artış göstermiştir. Bu duruma sebep olarak daha önce yapılan çalışmalar göstermektedir ki, uygulanan kaynak akımı arttıkça kaynak bölgesinde oluşan ısı miktarı da artmaktadır. Böylece, kaynak nüfuziyeti de artarak daha fazla temas gerçekleşmekte ve daha büyük kaynak çapı oluşarak kaynak mukavemeti de artmaktadır [8], [20].

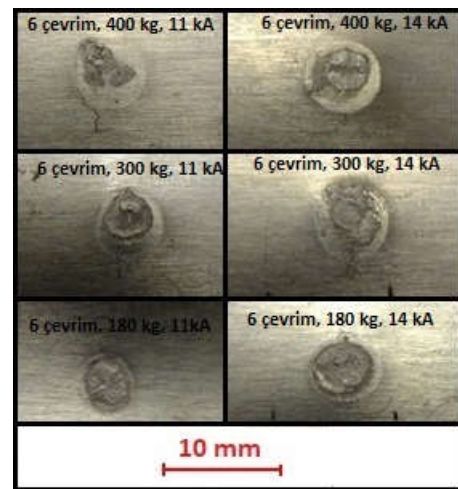


Şekil 3. 6 çevrimlik sabit kaynak süresine bağlı olarak elde edilen maksimum çekme mukavemetleri (Maximum tensile strengths obtained with 6 cycles of constant welding time)

Bu durumu gösterebilmek amacıyla çalışmada çekirdek çapı ölçümleri gerçekleştirilmiş ve bu durumlarda örtüştüğü sonucuna varılmıştır. Sabit çevrim süresi ve sıkıştırma miktarı için kaynak akımının artırılması çekirdek çapını da arttırmıştır (Şekil 4.a). Bu çekirdek çapı artışı gözlemek amacıyla, çalışmada belirtilen aynı çevrim ve aynı sıkıştırma yükleri için kaynak akımının 11 kA' den 14 kA' e artırılmasıyla elde edilen numunelerin kopma yüzeyleri Şekil 4.b. de gösterilmiştir. Buna göre, çekirdek çaplarının artan akım ile birlikte artmış olduğu makroyapı görüntüleri ile de gözlemlenmiştir.



Şekil 4.a. Örnek çekirdek çapı ölçümleri.(Sample core diameter measurements)

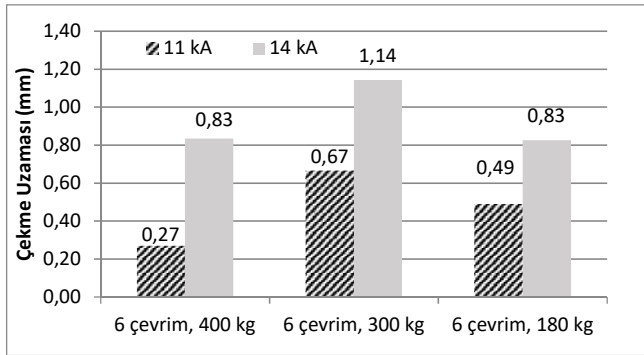


Şekil 4.b. Örnek ara yüzey kopması gösteren yüzeyler ve çekirdek bölgeleri. (Sample macro morphology of interfacially fractured surfaces and core regions)

Ayrıca Şekil 4b' de, elektrik direnç kaynağı uygulanmış numunelerin kopma tipi incelendiğinde, kırılma yüzeyi nispeten pürüzsüz ve parlak olmasından ötürü numunelerin "ara yüzey kopması" şeklinde koptukları tespit edilmiştir [21].

Yine Şekil 3 bir başka açıdan değerlendirildiğinde, kaynak akımı artırılması ile elde edilen çekme yükündeki maksimum artış yaklaşık olarak %73 lük bir oran ile en düşük sıkıştırma yükü olan 180 kg ile elde edilmiştir. Bu durumun sebebi ise; düşük baskı kuvvetinin kaynak edilen parçalar arasındaki direnci arttıracığı ve akım geçişiyle beraber patlama oluşturması gösterilebilir [2]. Ayrıca Şekil 3'e göre optimum mukavemet değerine, 6 çevrim kaynak süresi, 180 kg'lık sıkıştırma yükü ve 14 kA'lık kaynak akımı parametrelerinde ulaşılmıştır.

Diğer taraftan aynı parametrelerde elektrik direnç kaynağı yapılan parçaların çekme uzaması değerleri Şekil 5'te görülmektedir. Buna göre, aynı çevrim ve aynı sıkıştırma yüklerinde kaynak akımı 11kA'dan 14 kA'ya artırıldığında çekme uzaması da artış göstermiştir. Bu durum, maksimum çekme kuvveti ile benzer bir davranıştır. Kaynaklı yapılarda dayanım ve uzama arasındaki doğru orantı beklenen bir durumdur [4].



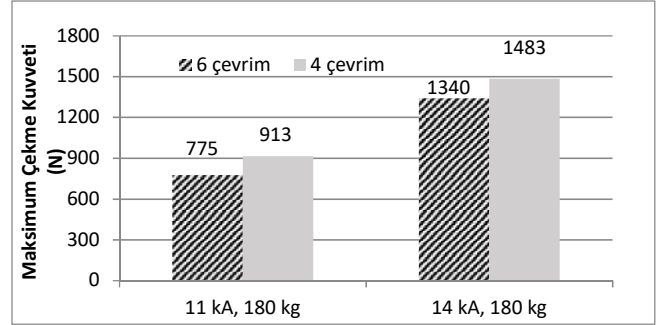
Şekil 5. 6 çevrimlik sabit kaynak süresine bağlı olarak elde edilen çekme uzamaları. (Tensile elongation obtained due to 6 cycles of fixed welding time)

Çalışmanın ikinci aşamasında, maksimum mukavemet değeri 180 kg'lık sıkıştırma yükü ile elde edildiğinden ötürü, bu kez sıkıştırma yükü ve akım değerleri sabit tutulup çevrim süresi karşılaştırılması yapılmıştır. Bu amaçla farklı kaynak süresi olarak 4 çevrim seçilerek 6 çevrim ile elde edilen mukavemet değerleriyle karşılaştırma yapılmıştır.

Şekil 6'ya göre sabit akım ve sabit sıkıştırma yükü için, çevrim süresi 6 çevrimden 4 çevrime

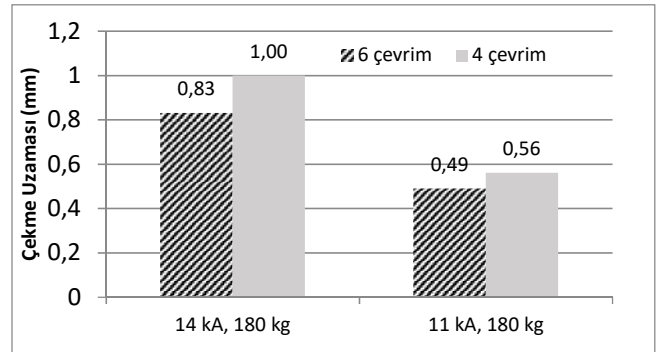
düşürüldüğünde kaynaklı parçaların maksimum çekme kuvvetlerinde artış gözlemlenmiştir.

11 kA'lık kaynak akımında 4 çevrim süresi seçildiğinde kaynak mukavemeti yaklaşık olarak % 18 artarken, 14 kA'lık kaynak akımında ise mukavemet yaklaşık olarak % 11 artarak çalışma içerisindeki en yüksek mukavemet değeri olan 1483 N'a ulaşılmıştır. Çevrim süresinin azaltılmasıyla beraber çekme mukavemetindeki azalma ile ilgili sebep olarak literatürde, kaynak edilecek malzemelerin kaynak esnasında plastik sahaya geçip uygun olmayan kaynak kalitesi oluşumu [22] ileri sürülmüştür.



Şekil 6. Sabit akım ve sabit sıkıştırma yükünde çevrim süresinin dayanıma etkisi. (The influence of cycle time on strength at constant current and compression load)

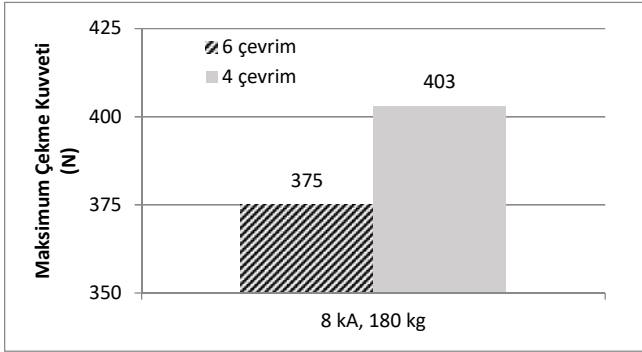
Diğer taraftan; Şekil 3 ve Şekil 5 ilişkisine benzer olarak Şekil 6 ve Şekil 7 arasında da benzer davranış görülmektedir. Yani, sabit kaynak akımı ve sıkıştırma yükü için kaynak zamanı azaldıkça maksimum çekme kuvvetinde olduğu gibi çekme uzaması da artmıştır.



Şekil 7. Sabit kaynak akımı ve kaynak yüküne bağlı olarak elde edilen çekme uzamaları (The tensile elongations obtained depending on the fixed welding current and the welding load)

Çalışmanın son kısmında ise daha düşük kaynak akımının kaynak mukavemeti üzerindeki etkisini incelemek amacıyla; 8 kA'lık kaynak akımı seçilerek, çalışma kapsamında en yüksek mukavemetin elde edildiği sıkıştırma yükü olan 180 kg, 4 ve 6 çevrimlik kaynak süreleri için kaynak işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Buna göre Şekil 6'da da olduğu gibi kaynak süresi 6 çevrimden 4

çevrime düşürüldüğünde çekme dayanımı yaklaşık olarak %7 lik bir artış göstererek 375 N dan 403 N a çıkmış ancak kaynak mukavemeti çok düşük seviyelerde kalmıştır. Ayrıca parçalarda önem gösteren çekme uzaması değerleri de gözlemlenmemiştir.



Şekil 8. Düşük kaynak akımı için mukavemet değerleri (Strength values for low welding current)

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, farklı elektrik direnç kaynağı parametrelerinin AA5754-H111 malzeme üzerindeki çekme dayanımı, çekme uzaması ve çekirdek çapı etkileri incelenmiştir. Farklı kaynak parametreleri olarak; kaynak akımı (kA), çevrim süresi ve kaynak sıkıştırma yükü (kg) seçilmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre, çekme dayanımının tek bir parametreye bağlı olmadığı ve kaynak akımı, kaynak süresi ve kaynak sıkıştırma yükü değerlerine bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, elektrik direnç kaynağı uygulamalarının farklı parametrelerle ilişkili olduğu ve yalnız tek bir parametrenin kaynak birleşmesinin daha mukavim olması için yeterli olmayacağı sonucunu göstermiştir. Kaynak parametrelerindeki değişimin kaynak mukavemetini artırabileceği ve optimum değerlerin analiz edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada optimum kaynak mukavemetinin, 14 kA kaynak akımı, 4 kaynak çevrimi ve 180 Kg (kaynak yükü) kombinasyonu ile 1483 N olarak elde edildiği sonucuna varılmıştır.

REFERENCES

- [1] E. Doruk, M. Pakdil, G.Çam, I. Durgun, U. C. Kumru, "Otomotiv sektöründe direnç nokta kaynağı Tofaş uygulamaları," *Kaynak Teknolojisi IX. Ulusal Kongre ve Sergisi*, pp. 29–38, 2015.
- [2] N. Ferudun, "Akım ve basıncın direnç kaynak kalitesine etkisi," *Metalurji Dergisi*, vol. 175, pp. 32–34, 2015.
- [3] YB. Demir, E. İncekar, Ö. Dincel and M. Elitaş, "İleri Dayanımlı Çeliklerde Nokta Direnç Kaynağı Etkilerinin İncelenmesi," *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, pp. 92–100, 2017.
- [4] M. Sun, S. T. Niknejad, G. Zhang, M. K. Lee, L. Wu and Y. Zhou, "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded AZ31/AA5754 using a nickel interlayer," *Materials and Design*, vol. 87, pp. 905–913, 2015.
- [5] N. Chen, H.-P. Wang, B. E. Carlson, D. R. Sigler and M. Wang, "Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 243, pp. 347–354, 2017.
- [6] J. Chen, X. Yuan, Z. Hu, C. Sun, Y. Zhang and Y. Zhang, "Microstructure and mechanical properties of resistance-spot-welded joints for A5052 aluminum alloy and DP 600 steel," *Materials Characterization*, vol. 120, pp. 45–52, 2016.
- [7] D. Sun, Y. Zhang, Y. Liu, X. Gu and H. Li, "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded joints of 16Mn steel and 6063-T6 aluminum alloy with different electrodes," *Materials and Design*, vol. 109, pp. 596–608, 2016.
- [8] Y. Kaya and N. Kahraman, "Titanyum sacların nokta direnç kaynağı ile birleştirilmesinde kaynak parametrelerinin çekirdek oluşumuna etkisi," *Journal of Polytechnic*, vol. 14, no. 4, pp. 263–270, 2011.
- [9] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac and E. Ilhan, "Welding time effect on mechanical properties of automotive sheets in electrical resistance spot welding," *Materials and Design*, vol. 29, pp. 1427–1431, 2008.
- [10] D. Özyürek, "An effect of weld current and weld atmosphere on the resistance spot weldability of 304L austenitic stainless steel," *Materials and Design*, vol. 29, pp. 597–603, 2008.

- [11] D.Q. Sun, B. Lang, D.X. Sun and J.B. Li, "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded magnesium alloy joints," *Materials Science and Engineering A*, vol. 460–461, pp. 494–498, 2007.
- [12] M. Pouranvari, H. R. Asgari, S. M. Mosavizadch, P. H. Marashi and M. Goodarzi, "Effect of weld nugget size on overload failure mode of resistance spot welds," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 12, no. 3, pp. 217–225, 2007.
- [13] R.S. Florea, K.N. Solanki, D.J. Bammann, J.C. Baird, J.B. Jordon and M.P. Castanier, "Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation," *Materials and Design*, vol. 34, pp. 624–630, 2012.
- [14] S. Hassanifard and M. Zehsaz, "The effects of residual stresses on the fatigue life of 5083-O aluminum alloy spot welded joints," *Procedia Engineering*, vol. 2, pp. 1077–1085, 2010.
- [15] A.M. Pereira, J.M. Ferreira, A. Loureiro, J.D.M. Costa and P.J. Bártolo, "Effect of process parameters on the strength of resistance spot welds in 6082-T6 aluminium alloy," *Materials and Design*, vol. 231, pp. 2454–2463, 2010.
- [16] S. Wu, B. Ghaffari, E. Hetrick, M. Li, Z. Jia and Q. Liu, "Microstructure characterization and quasi-static failure behavior of resistance spot welds of AA6111-T4 aluminum alloy," *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 24, pp. 3879–3885, 2014.
- [17] L. Han, M. Thornton, D. Li and M. Shergold, "Effect of governing metal thickness and stack orientation on weld quality and mechanical behaviour of resistance spot welding of AA5754 aluminium," *Materials and Design*, vol. 32, pp. 2107–2114, 2011.
- [18] J. Senkara and H. Zhang, "Cracking in spot welding aluminum alloy AA5754," *Welding Journal*, vol. 79, pp. 194–201, 2000.
- [19] X. Long and S. K. Khanna, "Residual stresses in spot welded new generation aluminium alloys Part B – finite element simulation of residual stresses in a spot weld in 5754 aluminium alloy," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 10, no.1, pp. 88–94, 2005.
- [20] S. A. Şafak, "Uçak endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının elektrik direnç nokta kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve mekanik özelliklerinin incelenmesi," *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2011.
- [21] H. Zhang, X. Qiu, F. Xing, J. Bai and J. Chen, "Failure analysis of dissimilar thickness resistance spot welded joints in dual-phase steels during tensile shear test," *Materials and Design*, vol. 55, pp. 366–372, 2014.
- [22] O. Yıldırım, "Otomotiv Endüstrisinde Kullanılan Nokta Direnç Kaynak Uygulamalarında İşlem Parametrelerinin Etkilerinin İncelenmesi," *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2010.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 15.06.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 23.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.321767	

Zeolit ve mermer tozu kullanılarak üretilen CAS seramiklere mekanik aktivasyonun etkisi

Zafer Yavuz Merkit^{*1}, Cansu Özarslan, Bahadır Aydın, Nil Toplan

ÖZ

Bu çalışmada CAS (CaO-Al₂O₃-SiO₂) esaslı seramikler zeolit, mermer tozu ve alümina tozları kullanılarak; 400 ve 600 dev/dk hızlarında mekanik aktivasyon ile üretilmiştir. Aktive edilen tozlar hidrolik pres yardımı ile şekillendirildikten sonra 1000-1200°C sıcaklık aralığında 1 ve 5 saat süre ile sinterlenmiştir. Aktivasyon öncesi ve sonrası tozların ve sinterlenmiş ürünlerin faz analizi XRD yöntemi ile belirlenmiştir. Mikroyapı analizleri SEM ile gerçekleştirilmiştir. Aktivasyon sonrası tozlarda amorflaşma tespit edilmiş, aktivasyon hızının artması tane boyutunu düşürmüştür bununla beraber aglomerasyon oluşmuştur. Sinterleme sonucunda gözenekli bir yapı oluşmuş; sıcaklık 1200°C'ye çıktığında gözenek boyutları belirgin bir şekilde artmıştır.

Anahtar Kelimeler: mekanik aktivasyon, zeolit, mermer tozu, CAS seramikler

Effect of mechanical activation on CAS ceramics from produced using zeolite and marble powder

ABSTRACT

In this study, CAS (CaO-Al₂O₃-SiO₂) based ceramics were produced by mechanically activation at speeds of 400 and 600 rpm using zeolite, marble powders and alumina. The activated powders were sintered at 1000-1200°C temperature for 1-5 hours after shaped by hydraulic press. Phase analysis of activated and non-activated powders and sintered products were determined by XRD method. Scanning electron microscopy (SEM) was used to analyze the microstructure of samples. After activation amorphization was detected in the powders, while agglomeration was observed with the increase of the activation rate and the decrease of the grain size. As a result of sintering, a porous structure was formed; when the temperature went up to 1200 °C, the pore sizes increased noticeably.

Keywords: mechanical activation, zeolite, marble powders, CAS ceramics

* Corresponding Author

¹ Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, zafermerkit@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Başlangıç hammaddelerinin mekanik olarak aktive edilerek başlangıç tozu olarak kullanımı umut verici bir yöntemdir. Mekanik bir yöntem olan mekanik aktivasyonun temel çalışma prensibi; enerji kullanarak diğer toz üretim yöntemlerinde olduğu gibi yeni serbest yüzeylerin oluşturulmasına dayanmaktadır. Parçacıklar arasındaki temas yüzeylerini arttıran mekanik öğütmenin sonucunda parçacık boyutu azalır. Ayrıca, sistemin enerjisi artar ve bunun sonucunda reaksiyon sıcaklığında bir düşüş gerçekleşerek reaksiyon kapasitesini artırır. Reaksiyon kapasitesini artırma işlemi sırasında bir malzeme kimyasal olarak asal kalırsa, işleme mekanik aktivasyon denir. Mekanik aktivasyon, harici bir reaktant yokluğunda, mekanik kuvvete maruz kalan malzemelerin enerji durumunun, yapısının ve kimyasal özelliklerinin değişimini içerir. Özellikle bu mekanik işlem, katıların yüzey ve yapısında değişikliklere neden oldukları için önemlidir. Çoğu durumda, mekanik-kimyasal olarak işleme tutulmuş malzeme yapısındaki bu değişiklikler, ısı işlem ile oluşan fazlarda belirli bir değişikliğe neden olur [1-3]. Mekanik-kimyasal yöntemler başta metalurjik üretim alanları olmak üzere, çeşitli işlevsel seramiklerin üretilmesi için gerekli başlangıç tozlarının hazırlanmasında da kullanılmaktadır. Çeşitli organik ve inorganik atıkların seramik üretiminde değerlendirilmesi için ön işlem olarak mekanik yöntemlerin uygulanması mümkündür [4].

Temel silikat sistemlerinden birisi olan CaO-Al₂O₃-SiO₂ (CAS) seramikler endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. CAS poroz seramiklerin faz yapısı ve mikroyapısal özellikleri, bileşim, sinterleme sıcaklığı ve süresine bağlıdır. CAS üçlü denge diyagramındaki anortit, gehlenit, wollastonit gibi temel fazlar; kompozisyon ve ısı işlem şartları ayarlanarak elde edilebilir [5,6]. Birçok metalurjik atık ve doğal kayaç bu sistemi içerdiğinden dolayı bunlardan geleneksel veya toz yöntemleri ile seramik ve cam-seramik üretmek mümkündür. CAS'lar pompalarda ve borularda kaplama malzemesi, yer karosu ve dış cephe kaplaması olarak kullanımının yanısıra; yüksek sertlik, çizilme direnci ve kimyasal direnç ile düşük hammadde maliyetlerinden dolayı inşaat alanındaki zemin ve duvar kaplamaları için de iyi bir aday malzemedir [5,7].

Zeolit doğal bir alümina silikat grubu mineralidir ve tekrarlı silisyum-oksijen (SiO₄) ve alüminyum-oksijen (AlO₄) tetrahedral birim hücrelerinin oluşturduğu üç boyutlu ağ yapısına sahiptir. Yapısında Na⁺, K⁺, Ca²⁺ ve Mg²⁺ gibi alkali ya da toprak alkali yükleri içerirler [8]. Zeolitler çeşitli türde seramiklerin üretiminde hammadde olarak kullanılmaktadırlar [9-11]. Mermer tozu, mermer blokları şekillendirme sürecinde ortaya çıkan bir atık malzemedir. Kesme prosesleri boyunca su, kesme ucunun aşırı ısınmasını ve toz oluşumunu önlemek için kullanılır. Sonuç olarak, su ve mermer tozu karışımı çamur olarak oluşturur. Türkiye yaklaşık 5,2 milyar metreküp mermer rezervine sahip önemli üreticidir. Bir mermer bloğun yaklaşık %30-40'ının kesim sürecinde boşa gittiği göz önüne alındığında, Türkiye'de mermer üretiminde yaklaşık 2.500.000 ton mermer çamuru atık olarak üretilmektedir [12].

Poroz seramikler filtreler, katalizör destekçileri, elektrotlar, cerrahi implantlar vb. dahil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmakla beraber; su arıtma sistemleri, uzay araştırmaları, tıbbi implantlar, yapay doku mühendisliği, sensör uygulamalarında da dikkat çekici malzemelerdir [13,14]. Ayrıca seramik malzemelerin yüksek termal ve kimyasal dayanımı ile uzun kullanım süresine sahip olmaları, bu malzemelerin poroz membran olarak kullanılmasında avantaj sağlar [15].

Bu çalışmada doğal hammadde kaynaklarından zeolit ve alüminaya (Al₂O₃) ilaveten atık hammadde kaynağı olarak mermer tozu kullanılarak hazırlanan CAS bileşimli seramik tozu mekanik aktivasyon ile üretilmiştir. Mekanik aktivasyon etkisi ile sinterleme sıcaklığının düşmesi bunun sonucunda oluşan mikroyapısal özelliklerin irdelenmesi hedeflenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL)

Başlangıç bileşimi, CAS (CaO-Al₂O₃-SiO₂) üçlü denge diyagramına göre stokiometrik olarak anortit+wollastonit oluşum sınırını, ağırlıkça %57,5 SiO₂, %27,5 CaO, %15 Al₂O₃ bileşimini karşılayacak şekilde zeolit, mermer tozu ve alümina kullanılarak hazırlanmıştır. Mec Enerji firmasından temin edilen zeolit ve Sakarya bölgesi mermer işleme atölyelerinden sağlanan mermer tozu atığının kimyasal bileşimi Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Zeolit ve mermer tozunun XRF analizi; *K.K: Kızdırma kaybı. (XRD analysis of zeolite and marble powder, *K.K: Loss on ignition.)

Bileşim (ag.%)	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	MgO	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅	K.K.*
Zeolit	2,38	13,12	76,97	4,63	0,19	1,67	0,94	0,10	-	-	-
Mermer tozu	58,16	0,24	0,39	0,27	-	0,14	0,25	-	-	-	40,56

Tablo 2. CAS bileşiminde kullanılan hammaddeler ve miktarları. (Raw materials and amounts that used in CAS composition.)

Hammadde	Ağırlık (g)
Zeolit	76,1
Mermer tozu	56,6
Al ₂ O ₃	5

Zeolit, belirlenen CAS bileşiminin başlıca SiO₂ kaynağını sağlarken; CaO ve Al₂O₃ bileşiklerinin bir kısmını da karşılamaktadır. Mermer tozu ise başlangıç bileşiminin başlıca CaO kaynağını oluşturmuş; bu iki hammaddeye ilaveten bileşimin tamamlanması için Seydişehir bölgesinden temin edilen % 99,9 saflıkta alümina (Al₂O₃) kullanılmıştır. Kullanılan hammaddeler Tablo2’de verilen miktarca tartımları gerçekleştirildikten sonra saf su içerisinde yaş olarak 4 saat bilyeli değirmende alümina bilye kullanılarak karıştırılmıştır. Yaş karışım 110°C’de 24 saat etüvde kurutulduktan sonra yüksek enerjili gezegensel değirmende (Fristch Pulverisette 6) WC bilye ve kap yardımı ile 1:30 toz/bilye oranında mekanik olarak aktive etmek amacı ile öğütülmüştür. Öğütme işlemi 400 dev/dk ve 600 dev/dk’lık iki farklı hızda 60 dk süre ile uygulanmıştır. Aktive edilen CAS toz bileşimleri tek eksenli hidrolik press yardımı ile 10 mm çapında silindirik paslanmaz çelik kalıba 290 MPa yük altında tabletler halinde şekillendirilmiştir. Şekillendirilme işleminde kalıp içerisinde yağlayıcı olarak çinko stearat kullanılmıştır. Şekillendirilen örnekler ısıtıcı eleman olarak MoSi₂ içeren elektrikli fırın içerisinde (Nabertherm) 5°C/dk ısıtma hızında 1000°C ve 1100°C sıcaklıklarda 1 ve 5 saat; ayrıca 1200°C’de 1 saat süre ile sinterlenmiştir. CAS başlangıç tozunun mekanik aktivasyon öncesi ve sonrası ile sinterleme sonrası faz analizleri, $\lambda=1,54056$ dalga boyunda CuK α ışın demeti kullanılarak tarama açısı (2 θ) 10 ile 90° arasında olacak şekilde 2°/dk tarama hızında X-ışınları difraktometresi (Rigaku D-max) yardımı ile görüntülenmiştir. Mekanik aktivasyon öncesi ve sonrası kullanılan tozların mikroyapıları ile farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmiş CAS

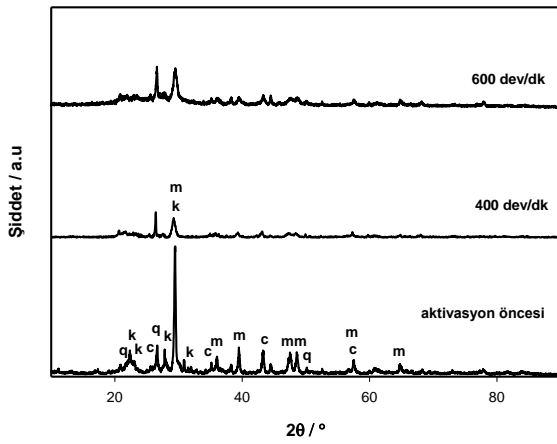
seramiklerin mikroyapıları, taramalı elektron mikroskobu (JEOL,6060 LV) ile incelenmiştir.

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME (RESULTS AND DISCUSSION)

Zeolit, mermer tozu ve alumina hammaddeleri kullanılarak hazırlanan aktivasyon öncesi CAS başlangıç tozunun ve bu tozun 1:30 toz/bilye oranı ile 400 dev/dk ve 600 dev/dk hızlarında 1 saat süre ile mekanik olarak aktive edilmesi sonrasında oluşan kristal faz ve amorflaşmayı belirlemek için XRD analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 1’de verilmektedir. Aktivasyon öncesi başlangıç toz karışımının kristal yapısında klinoptilolit, korundum, kalsit ve kuvars fazları çeşitli pik şiddetlerinde ve derecelerde görülmektedir. Klinoptilolit zeolit türlerinden biridir ve Dünya üzerinde kullanımı en yaygın olan zeolit çeşididir [16]. Farklı hızlarda mekanik olarak aktive edilen tozlarda zeolit, korundum ve kalsit fazlarının pik şiddeti belirgin bir şekilde azalmıştır. Ancak kuvars fazının pik şiddetinin mekanik öğütme ile belirgin bir değişime uğramadığı gözlemlenmiştir. Zeolitin pik şiddetinin azalması; zeolit kristalinin dış Si-O-Si ve Si-O-Al bağlarının kırılması ve zeolit parçacıklarının öğütme ile boyutunun azaltılmasından dolayı kaynaklanmaktadır [17]. Kuvars fazının sertliğinin yüksek olması (Mohs sertliği 7) öğütme sonucu partikül boyutunun azalmasını zorlaştırmış bu nedenle pik şiddeti CAS bileşim tozundaki diğer fazlara oranla fazla bir değişim göstermemiş olabilir. Yüksek enerjili mekanik öğütme ile yapıda amorflaşma görülmüş; öğütme hızının 600 dev/dk olduğu durumda bu amorflaşmanın daha belirgin olduğu tespit edilmiştir. Mekanik aktivasyon ile klinoptilolit türü zeolitte amorflaşma olduğu Rashchenko ve ark. [18] tarafından da ifade edilmiştir. Tunç [8] Zeolit, MgO, Al₂O₃ karışım tozuna uygulanan mekanik aktivasyon süresinin artması ile amorflaşmanın arttığını rapor etmiştir.

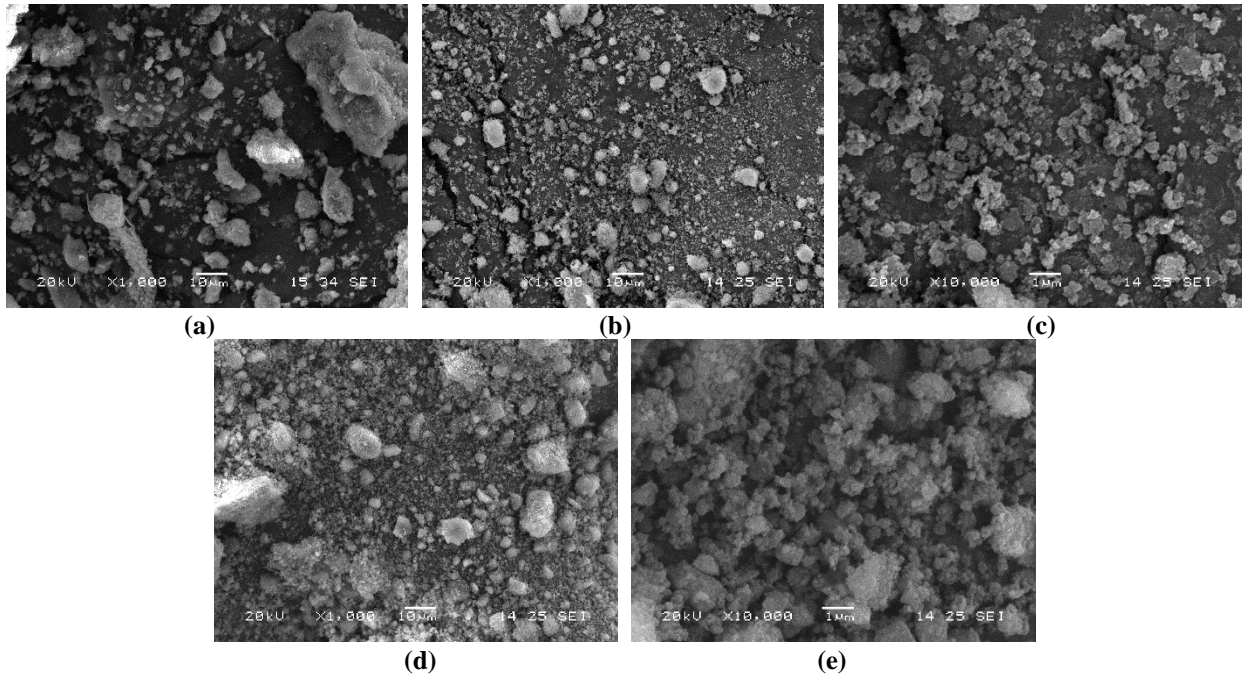
Başlangıç tozunun aktivasyon öncesi ile 400 dev/dk ve 600 dev/dk hızlarında 1 saat aktivasyon sonrası mikroyapı görüntüleri Şekil 2.’de

verilmiştir. Aktivasyon öncesi (Şekil 2.a) partikül boyut aralığının 5 μ ile 30 μ arasında değişmekte olduğu ve düzensiz şekilli tanelerin heterojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. 400 dev/dk hız ile aktive edilen tozun (Şekil 2.b-c) partikül boyutlarının düzensiz şekilde 1 μ altına indiği görülmüş ancak aglomerasyon nedeni ile yaklaşık 10 μ büyüklüğünde topaklar oluşmuştur. Aktivasyon hızı 600 dev/dk'ya çıktığında ise (Şekil 2.d-e) mikron altı partiküllerin oluşturduğu topaklanmanın daha belirgin olduğu ortaya çıkmıştır.

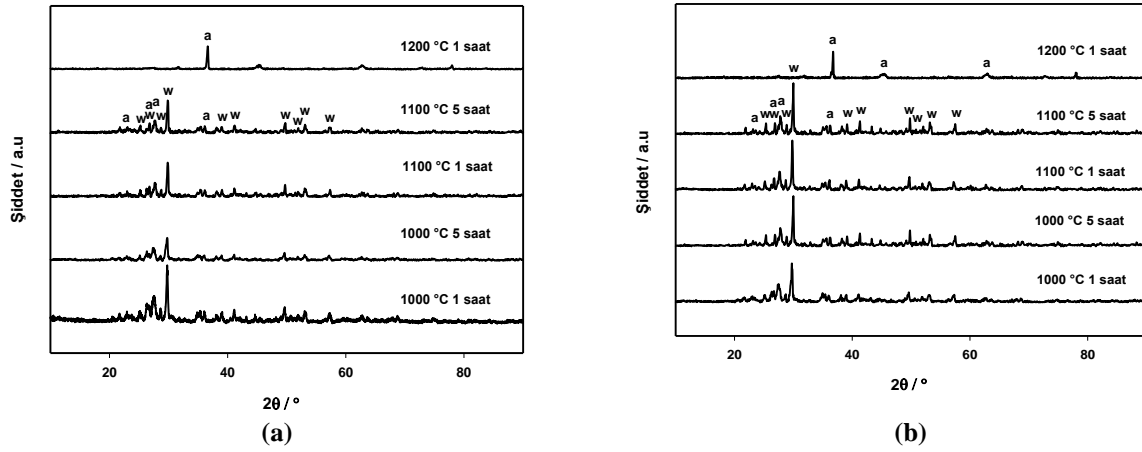


Şekil 1. CAS başlangıç tozunun aktivasyon öncesi, 400 dev/dk ve 600 dev/dk hızlarında 1 saat aktivasyon sonrasında ait XRD grafiği; q:kuvars, k: klinoptiloid, m: kalsit, c: korundum. (XRD graph of CAS starting powder before activation, activation after 1 hour at 400 rpm and 600 rpm; q: quartz, k: clinoptiloid, m: calcite, c: corundum.)

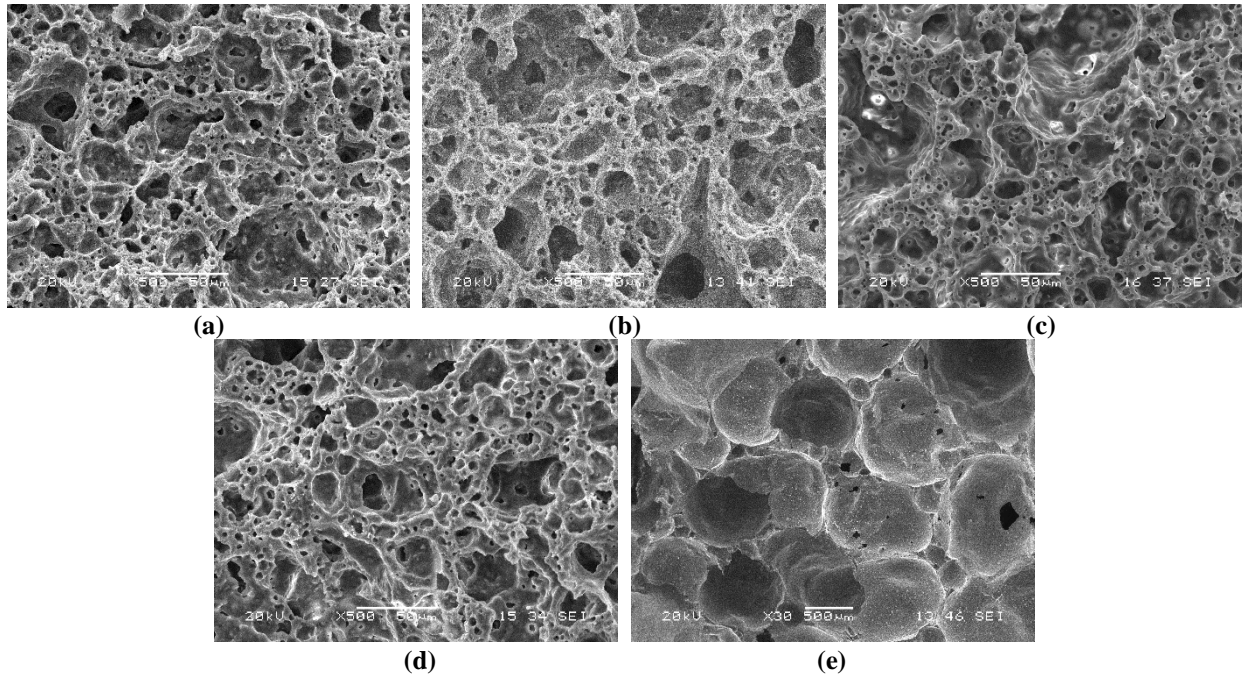
Oluşan topakların boyutu mikron altı boyuttan yaklaşık 20 μ büyüklüğe kadar değişmektedir. Demirkıran ve ark. [9] zeolit, MgO ve Al₂O₃ toz karışımının 600 dev/dk hızında 0,5, 1 ve 2 saat süre ile 1:20 toz/bilye oranını ile mekanik olarak aktivasyonu sonrası benzer şekilde oluşan topaklanma eğiliminden bahsetmişlerdir. Buzimov ve ark. [19] doğal zeolitin 350 dev/dk hızda 4 saat sürede aktive edilmesi ile optimum yüzey alanına ulaştığını ve artan süreyle beraber topaklanma nedeni ile yüzey alanının azalmaya başladığını rapor etmişler. Mevcut çalışmada ise benzer topaklanma öğütme hızından kaynaklıdır. 400 dev/dk ile 600 dev/dk hızlarında aktive edilen tozların şekillendirme sonrası 1000°C'den 1200°C'ye varan sıcaklık aralığında ve değişik sürelerde sinterlenmesi ile oluşan kristal fazlar XRD ile belirlenmiş ve sonuçlar Şekil 3.'de verilmiştir. 400 dev/dk hızda hazırlanan CAS tozunun 1000°C-1150°C arasında sinterlenmesi ile anortit (CaAl₂Si₂O₈), wollastonit (CaSiO₃) fazları çeşitli 2 θ açılarında tespit edilmiştir. Stokiyometrik olarak anortit+wollastonit oluşum sınır bölgesinde hazırlanan CAS tozunda sinterleme koşulları 1200°C'de 1 saate çıktığında kristal faz olarak sadece anortit tespit edilmiştir. Literatürde Al₂O₃, SiO₂ ve CaCO₃ hammaddelerinden hazırlanan CAS poroz seramiklerde anortit fazı 1300°C [20] ve 1400°C [21] sıcaklıklarda elde edilmiştir.



Şekil 2. Başlangıç tozunun a. aktivasyon öncesi, 400 dev/dk aktivasyon sonrası b. 1000, c. 10000 büyütmede ve 600 dev/dk aktivasyon sonrası d. 1000, e. 10000 büyütmede SEM görüntüsü. (SEM image of a. non-activated, activated at 400 rpm b.1000, c. 10000 magnification and activated at 600 rpm d. 1000, e. 10000 magnification of starting powders.)



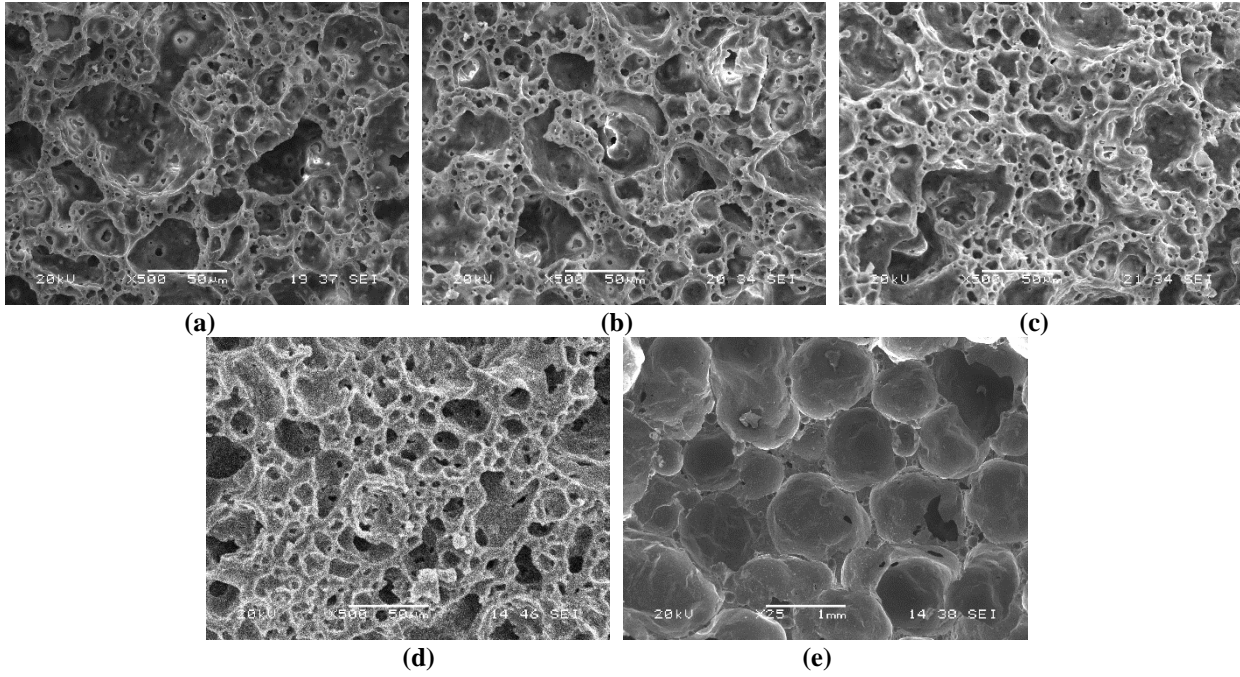
Şekil 3.a. 400 dev/dk b. 600 dev/dk hızlarında aktive edilen tozların farklı sıcaklık ve sürelerde sinterlenmesi ile üretilen seramiklerin XRD analizleri; a:anortit, w: wollastonit. (XRD analysis of ceramic that produce with different temperature and time from the activated powders at a. 400 rpm and b. 600 rpm; a:anorthite, w: wollastonite.)



Şekil 4. 400 dev/dk hızında öğütülerek hazırlanan tozların, 1000°C'de a. 1 ve b. 5 saat; 1100°C'de c. 1 ve d. 5 saat; 1200°C'de e. 1 saat süre ile sinterlenmesi sonucu oluşan seramiklerin mikroyapı analizleri. (Microstructure analysis of ceramics that paped by grinding at 400 rpm after sintering at 1000 °C a. 1, b. 5 hours, at 1100 °C c. 1, d. 5 hours and at e. 1200 °C 1 hours.)

Zeolitın mekanik aktivasyon sonucu amorflaşması ve içerdiği K_2O ve NaO gibi flaks yapıcı oksitler, anortit oluşumu için gerekli sinterleme sıcaklığını düşürücü etki yapmış olabilir. Mekanik öğütmenin 600 dev/dk'ya çıkarılması sonucunda benzer şekilde anortit ve wollastonit fazları görülürken; wollastonit kristaline karşılık gelen 2θ açılarında pik şiddeti daha yüksek çıkmıştır. Göktaş ve ark. [22] mermer tozu ile kuvars kumunun mekanik aktivasyonu ile tane boyutunun azalmasını; wollastonitin oluşum sıcaklığını 1000°C'ye düşüğünü belirtmişlerdir. Mevcut çalışmada ise tane küçülmesi 600 dev/dk'da daha yüksek olduğu için bu durum wollastonit oluşumunu teşvik etmiştir. Şekil 4'de 400 dev/dk hızda mekanik öğütme ile hazırlanan CAS tozunun farklı sıcaklık

ve sürelerde sinterlenmesi sonucu oluşan mikroyapı görüntüleri verilmiştir. 1000°C (Şekil 4.a-b) ve 1100°C'de (Şekil 4.c-d) sinterlenen ürünlerde, düzensiz şekilde 5-60 μ boyut aralığına sahip yoğun makro gözenekli bir yapı dikkat çekmektedir. Bu yapının oluşması hammadde olarak kullanılan mermer tozunun kalsinasyonu sonucu açığa çıkan CO_2 gazından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bir diğer porozite oluşumu ise ince yapıli partiküllerin birbirine bağlanarak 3 boyutlu kanal yapısı oluşturması şeklinde gerçekleşmektedir. Sinterleme sıcaklık ve süre artışı nispeten daha küçük kapalı gözeneklerin birleşerek daha büyük gözeneklerin oluşmasına neden olmuştur. Sinterleme mekanizması sıvı faz sinterlemesi şeklinde gerçekleşmiştir.



Şekil 5. 600 dev/dk hızında öğütülerek hazırlanan tozların, 1000°C'de a. 1 ve b. 5 saat; 1100°C'de c. 1 ve d. 5 saat; 1200°C'de e. 1 saat süre ile sinterlenmesi sonucu oluşan mikroyapı analizleri. (Microstructure analysis of ceramics that prepared by grinding at 600 rpm after sintering at 1000 °C a. 1, b. 5 hours, at 1100 °C c. 1, d. 5 hours and at e. 1200 °C 1 hours.)

Zeolitin içerdiği Na_2O ve K_2O gibi alkali oksitler sıvı faz sinterlemesine neden olarak, sinterleme sıcaklığını düşürdükleri çeşitli araştırmalarda belirtilmiştir [23-24]. 1200°C'de vitrifikasyon yoğun bir şekilde görülmekle beraber; 60 μ ve altı büyüklükteki por yoğunluğu dramatik olarak azalmış boyutu 1 mm civarında küresele yakın şekilde porlar ve taneler belirmiştir. Aktivasyon süresi 600 dev/dk olan tozların 1000°C ve 1100°C'de sinterleme sonrası görüntüsünde (Şekil 5.a-d) benzer gözenek yapısına rastlanmıştır. Ancak 400 dev/dk hızda üretilen seramiklere kıyasla 50 μ civarı oluşan gözenek dağılımının arttığı söylenebilir. Kaba boyutlu tanelerin boyutunun büyük olması ortalama gözenek boyutunu artırırken buna karşı ince taneler yapı içinde gözenek dağılımını artırır [25]. 1200°C'de ise 1 mm boyutlu küresel gözenek ve taneler ile taneler arasında boşluklar gözlemlenmiştir. Bu durumda 1200°C her iki öğütme hızı için aşırı sinterleme durumunu oluşturmuştur. Merkit ve ark. [26] pomza ve yumurta kabuğu kullanarak ürettikleri CAS esaslı seramikleri 1000-1250°C'de 2 ve 5 saat sürelerde sinterlemişlerdir. 1200°C'nin altında sinterlenen numunelerde kısa bir süre sonra dağılma (parçalanma) gözlenmiş, ancak sinterlenebilirlik 1200°C ve üstünde sıcaklıklarda sağlanabilmiştir. Hem sinterleme hem de aktivasyon+sinterleme ile üretilen CAS seramiklerde poroziteli bir yapıya ulaşıldığını rapor etmişlerdir. Mevcut çalışmada ise mekanik

aktivasyon işlemi ile sinterleme sıcaklığının 1000°C'lere düştüğü tespit edilmiştir.

4. GENEL SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada farklı öğütme hızlarında mekanik aktivasyon ile hazırlanan zeolit, mermer tozu ve Al_2O_3 hammaddelerinden oluşan CAS esaslı seramik üretilmiştir; aktivasyonun hem başlangıç tozuna ve hem de sinterleme sonrası üretilen seramikler üzerindeki faz ve mikroyapısal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Genel olarak elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Mekanik aktivasyon sonucu her iki öğütme hızı için (400 dev/dk ve 600 dev/dk) başlangıç tozu karışımında amorfleşme tespit edilmiştir. Aktivasyon hızının artması amorfleşmeyi artmıştır. 400 dev/dk hızda 1 μ ile 10 μ arasında değişen taneler tespit edilmiştir. Bununla birlikte mikroyapıda aktivasyon hızı artışı ile tane boyutunun azalarak mikron altına indiği ancak ince tanelerin birleşerek topaklanma oluşturduğu görülmüştür.
- Her iki hızda hazırlanan tozların 1000°C ve 1100°C sıcaklıkta sinterleme sonrası faz analizinde wollastonit ve anortit fazları elde edilmiştir. Yüksek mekanik öğütme hızında üretilen CAS seramikte wollastonit pik şiddeti daha yüksek tespit edilmiştir. 1200°C'de 1 saat

sinterleme sonrası yapıda sadece anortit fazının varlığı dikkat çekmektedir.

• Sinterleme sonrası poroziteli yapı belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Poroziteler 1000°C ve 1100°C sinterleme sıcaklıkları sonrası kapalı ve düzensiz şekilde dağılım göstermiştir. Sinterleme mekanizması her iki öğütme parametresi için sıvı faz sinterlemesi olduğu tespit edilmiştir. 1200°C sıcaklık sonucu seramik yapısındaki porların boyutu, nispeten daha küçük porların birleşmesi ile yüksek bir artış sergilemiştir. 1000°C ve 1100°C’de düzensiz şekilde olan gözenekler 1200°C’de aşırı sinterleme ile küresel bir boyut kazanmıştır.

KAYNAKÇA (REFERANCES)

- [1] S. Koç, N. Toplan, K. Yıldız, H.O. Toplan, “Effects of mechanical activation on the non-isothermal kinetics of mullite formation from kaolinite,” *J. Therm Anal Calorim*, vol.103, no. 5, pp.791–796, 2011.
- [2] Z. Ceganac, Z. Acimovic, Lj. Andric, M. Petrov and S. Mihajlovic, “Mechanical activation of ceramic powders and it’s influence on the quality of the refractory linings,” in *Proceedings of 3rd BMC, Ohrid, R. Macedonia*, 2003, pp. 316-319.
- [3] A.O. Kurt, “Toz üretim yöntemleri ve sinterleme,” Ders notu, 2004-2010, pp.3-4 Available: www.aokurt.sakarya.edu.tr/dersler/r/dersler.htm [Accessed: 20-april-2017].
- [4] V.V. Boldyrev, “Mechanochemistry and mechanical activation of solids,” *Russian Chemical Reviews*, vol.75, no. 5, pp.177-189, 2006.
- [5] V. Günay, Ş. Yılmaz, “*Cam-seramik bilim ve teknolojisi*,” Tübitak Malzeme Enstitüsü, Gebze, 2010.
- [6] Z. Miao, N. Li, W. Yan, “Effect of sintering temperature on the phase composition and microstructure of anorthite-mullite-corundum porous ceramics,” *Ceramics-International*, vol. 40, no. 10, pp. 15795-15799, 2014.
- [7] S. Banijamali, H.R. Rezaei, B. Eftekhari Yekta, V.K. Marghussian, “Sinterability, crystallization and properties of glass-ceramic tiles belonging to CaF₂-CaO-MgO-Al₂O₃-SiO₂ system,” *Ceram. Int.*, vol. 33, no. 8, pp. 1557-1561, 2007.
- [8] T. Tunç, “Doğal zeolitten üretilen kordiyeritin karakterizasyonu,” Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2011.
- [9] T. Tunç, A.Ş. Demirkıran, “The effects of mechanical activation on the sintering and microstructural properties of cordierite produced from natural zeolite,” *Powder Technology*, vol. 260, pp. 7-14, 2014.
- [10] N.V. Boltakova, G.R. Faseeva, R.R. Kabirov, R.M. Nafikov, Yu.A. Zakharov, “Utilization of inorganic industrial wastes in producing construction ceramics. Review of Russian experience for the years 2000-2015,” *Waste Management*, vol. 60, pp. 230-246, 2017.
- [11] C. Vakifahmetoglu, “Zeolite decorated highly porous acicular calcium silicate ceramics,” *Ceramics International*, vol. 40, no. 8, pp. 11925-11932, 2014.
- [12] K.E. Alyamaç, A.B. Aydın, “Concrete Properties Containing Fine Aggregate Marble Powder,” *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 7, pp. 2208-2216, 2015.
- [13] G.S. Rohrer, M. Affatigato, M. Backhaus, R.K. Bordia, H.M. Chan, S. Curtarolo, A. Demkov, J.N. Eckstein, K.T. Faber, J.E. Garay, Y. Gogotsi, L. Huang, L.E. Jones, S.V. Kalinin, R.J. Lad, C.G. Levi, J. Levy, J-P. Maria, L. Mattos Jr., A. Navrotsky, N. Orlovskaya, C. Pantano, J. F. Stebbins, T. S. Sudarshan, T. Tani, K.S. Weil, “Challenges in Ceramic Science: A Report from the Workshop on Emerging Research Areas in Ceramic Science”, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol.95, no.12, pp. 3699-3712, 2012.
- [14] S. Zhu, S. Ding, H. Xi, Q. Li, R. Wang, “Preparation and characterization of SiC/cordierite composite porous ceramics,” *Ceramics International*, vol.33, pp.115-118, 2007.
- [15] F. Bouzerara, A. Harabi, S. Achour, A. Larbot, “Porous ceramic supports for membranes prepared from kaolin and dolomite mixtures,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol.26, pp.1663-1671, 2006.
- [16] M. Soylu, Ö. Gökkuş, “Türkiye’deki doğal zeolitler ve iyon değişimi uygulamaları,”

- OHÜ Müh. Bilim. Derg.*, vol. 6, no. 1, pp. 11-20, 2017.
- [17] Z. Yang, Y. Liu, C. Yu, X. Gu, N. Xu, “Ball-milled NaA zeolite seeds with submicron size for growth of NaA zeolite membranes,” *Journal of Membrane Science*, vol. 392–393, pp. 18-28, 2012.
- [18] L.K. Kazantseva, S.V. Rashchenko, “Optimization of porous heat-insulating ceramics manufacturing from zeolitic rocks,” *Ceramics International*, vol. 42, no. 16, pp. 19259-19265, 2016.
- [19] A.Y. Buzimov, S.N. Kulkov, E. Kurovics, W. Eckl, S. Pappert, “Influence of mechanical activation on the properties of natural zeolites from Tokaj Mountain,” *IOP Conf. Ser.:Mater. Sci. Eng.*, vol. 175, No.1, pp. 012033, 2017.
- [20] Y. Han, C. Li, C. Bian, S. Li, C-A. Wang, “Porous anorthite ceramics with ultra-low thermal conductivity,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 33, no. 13-14, pp. 2573-2578, 2013.
- [21] C. Li, Y. Han, L. Wu, K. Chen, Li-nan An, “Fabrication and properties of porous anorthite ceramics with modelling pore structure,” *Materials Letters*, vol. 190, pp. 95-98, 2017.
- [22] M. Gökteş, M. Erdemoğlu, “Aşırı öğütme ile mekanik olarak aktifleştirilmiş atık mermer tozları kullanılarak yapay wollastonit üretimi ve kullanımı,” *Madencilik*, vol. 53, no. 1-2, pp. 39-42, 2014.
- [23] R. Sokolář, M. Šveda, “The use of zeolite as fluxing agent for whitewares,” *Procedia Engineering*, vol.151, pp. 229-235, 2016.
- [2] R. de’ Gennaro, P. Cappelletti, G. Cerri, M. de’ Gennaro, M. Dondi, G.Guarini, A. Langella, D. Naimo, “Influence of zeolites on the sintering and technological properties of porcelain stoneware tiles,” *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 23, no. 13, pp. 2237-2245, 2003.
- [25] S. Liu, G.F. Chen, “Fabricating Porous Ceramics” in *Porous Materials Processing and Applications*, Elsevier UK., 2014, pp. 222-223.
- [26] Z.Y. Merkit, N. Toplan, “Pomza ve yumurta kabuğu tozlarından üretilen CAS esaslı seramiklerin ve kaplamaların karakterizasyonu,” *16th International Materials Symposium*, Denizli, Turkey, 2016, pp. 1322-1329.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 13.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 23.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.291987	

FV Panellerin modellenmesi için geliştirilen yeni bir FV simülör yapısı

Ersoy Beşer*¹

ÖZ

Güneş hücresi veya dizisi kullanan Fotovoltaik (FV) sistemlerin akım (I) – gerilim (V) ve güç (P) – gerilim (V) karakteristikleri hava koşullarına bağlıdır. Araştırmacıların, tekrarlanabilen laboratuvar koşullarında maksimum güç izleyici veya izleyici algoritmalarının performanslarını tespit edebilmeleri amacıyla güneş hücresi veya dizisinin (FV panel) çıkış karakteristiğine benzeyen ve gerçekçi verileri verebilen yardımcı bir ekipmana ihtiyaçları vardır. Bu ekipmana literatürde FV simülör adı verilmektedir. Bu çalışmada, FV panellerin laboratuvar ortamında modellenmesi için geliştirilen yeni bir FV simülör yapısı önerilmiştir. Önerilen FV simülör seri bağlı kaskat modüllerden meydana gelmektedir. FV simülörün en belirgin özelliği modül sayısının kolaylıkla artırılabilmesidir. Böylece FV simülörün çıkış geriliminin seviye sayısı artmaktadır. Bu özellik sayesinde FV simülörün I-V eğrisi, modellenmek istenen gerçek FV panelin I-V eğrisine daha çok benzemektedir. Önerilen yapının performansını göstermek amacıyla bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Simülasyon çalışmasında, ilk önce gerçek bir FV panelin I-V verileri simülasyon programına yüklenmiştir. Gerçek I-V verileri kullanılarak FV simülör için gerekli anahtarlama sinyalleri simülasyon programında oluşturulmuştur. 5 ve 6 modüllü durum için FV simülörün I-V ve P-V eğrileri elde edilmiş ve gerçek FV panelin eğrileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca farklı güneş ışınımları ve parçalı gölgelenme durumları için de I-V ve P-V eğrileri elde edilmiş ve sonuçları verilmiştir. Modül sayısı arttıkça gerçek FV panel ile önerilen FV simülörün I-V ve P-V eğrileri birbirine çok yakın çıkmaktadır. Önerilen yapının FV simülör olarak kullanılması oldukça uygundur. Gerek modüler yapıya sahip olması gerekse elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, önerilen simülörün yüksek gerilim ve güç uygulamalarında kullanılmaya elverişli olduğu görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: FV simülör, fotovoltaik simülör, I-V eğrisi, P-V eğrisi, parçalı gölgelenme

Development of a new PV simulator structure for modelling PV arrays

ABSTRACT

Current (I) - voltage (V) and power (P) – voltage (V) characteristics of Photovoltaic (PV) systems using solar cell or array depend on weather conditions. In order to test MPP trackers or MPPT algorithms in repeatable laboratory conditions, researchers need equipment that gives a realistic data similar to output

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - ebeser@kocaeli.edu.tr

characteristic of solar cell or array (PV panel). This equipment is defined as a PV simulator in the literature. In this study, a new PV simulator structure is proposed for modelling PV panels in laboratory environment. The proposed PV simulator basically consists of series connected cascaded modules. The significant feature of the PV simulator is being suitable for increasing the module number easily. Thus the level number of the output voltage increases in the simulator. Due to this feature, I-V curve of the simulator quite resembles the I-V curve of PV panel desired to be modelled. In order to show the performance of the proposed structure, a simulation study was carried out. First, I-V data of a real PV panel was loaded to the simulation program. The necessary switching signals were generated in the simulation program for PV simulator by using an actual I-V data. I-V and P-V curves were obtained for 5 and 6 module condition and results were compared to the curves of the sample PV panel. I-V and P-V curves were also obtained for different solar irradiance values and partial shaded conditions. By increase of the module number I-V and P-V curves of the PV simulator and sample PV panel quite resemble each other. The proposed structure is suitable for operating as a PV simulator. Both the simulator has a modular structure and the results are considered, it is seen that the proposed simulator is convenient for using at high voltage and power applications.

Keywords: PV simulator, photovoltaic simulator, I-V curve, P-V curve, partial shaded

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda, fosil enerji gibi klasik enerji kaynaklarının miktarının azaldığı ve yakın gelecekte biteceği bilimsel çevreler tarafından söylenmektedir [1]. Yenilenebilir enerji kaynakları, sanayileşmeye bağlı olarak oluşan yüksek enerji ihtiyacı ve fosil yakıtlarının miktarının azalması ile birlikte dikkat çeken bir konu haline gelmiştir [2]. Tüm yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde; sessiz, temiz ve güneş var olduğu sürece kullanılabilir tükenmez bir kaynak olduğu için fotovoltaik enerji son zamanlarda ilgi çekici bir konu haline gelmiştir [1]. Ek olarak kurulum maliyetinin düşük olması ve işletme maliyetinin de oldukça düşük olması sebebiyle FV sistemlerine olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır [3].

Güneş hücresi veya dizisi kullanan fotovoltaik sistemlerin çıkış karakteristikleri (I-V karakteristiği) hava koşullarına bağlıdır [1, 4]. Hava koşulları her an değişken ve kontrol edilemez olduğundan araştırmacılar, önerdikleri maksimum güç izleme algoritmalarının kalitesini doğrulamak için kullandıkları gerçek FV panel ile her zaman aynı I-V karakteristiği bulamayabilirler [5]. Dolayısıyla araştırmacıların, tekrarlanabilen laboratuvar koşullarında maksimum güç izleyici veya izleyici algoritmalarının performanslarını tespit edebilmeleri amacıyla güneş hücresinin çıkış karakteristiğine benzeyen ve gerçekçi verileri verebilen yardımcı bir ekipmana ihtiyaçları vardır [6, 7]. Bu ekipman sayesinde araştırmacılar deneysel ortamda maksimum güç izleyici veya

izleyici algoritmalarını test edebilir ve benzer şartlar için sonuçları karşılaştırabilirler. FV simülatörler, güç elektroniği elemanları kullanılarak gerçekleştirilen ve bir FV hücresi veya dizisinin I-V eğrisini izleyebilen cihazdır. Diğer bir deyişle FV simülatörler, akım kontrollü gerilim kaynağıdır. Ayrıca, FV simülatörler, gerçek FV panelin farklı sıcaklık, farklı ışımaya koşulları ve hatta parçalı gölgelenme durumlarına ait I-V karakteristiğini, deneysel ortamda elde edebilir. Ek olarak bu yapılar, laboratuvar ortamında yılın herhangi bir zamanı ve her türlü hava koşullarında kullanılabilir. Böylece araştırmacılar, maksimum güç izleyicilerini veya FV sistemli şebekeye bağlı eviricilerini hava koşullarına bağlı olmadan FV simülatör ile test edebilirler [8].

Dijital veya analog teknolojiyi kullanarak FV simülatör geliştirmenin birkaç yolu vardır. Bunlar; FV hücrenin veya foto diyodun çıkış akım veya gerilimini yükseltmek, sabit akım kaynağı, diyot ve direnç içeren FV eşdeğer devresini oluşturmak, FV hücrenin I-V karakteristiğini gerçekleyebilen, mikroişlemci / mikrodenetleyici veya analog devre ile kontrol edilebilen anahtarlamalı güç dönüştürücü kullanmak şeklinde sıralanabilir. Dijital teknolojinin hızlı ilerlemesinden dolayı üçüncü yöntem literatürde sık rastlanmaktadır [8]. Yapılan literatür araştırmasında, LLC rezonant DA/DA dönüştürücü [1, 3, 5], DA/DA düşürücü tip dönüştürücü [2, 4, 7, 8, 9], sıfır gerilim anahtarlamalı tam köprü tip dönüştürücü [6], iki kademeli senkron DA/DA dönüştürücü [10], yapısında iki yönlü dönüştürücü ve DGA gerilim kaynaklı doğrultucu olan iki kademeli dönüştürücü [11] ve DA/DA düşürücü-yükseltici

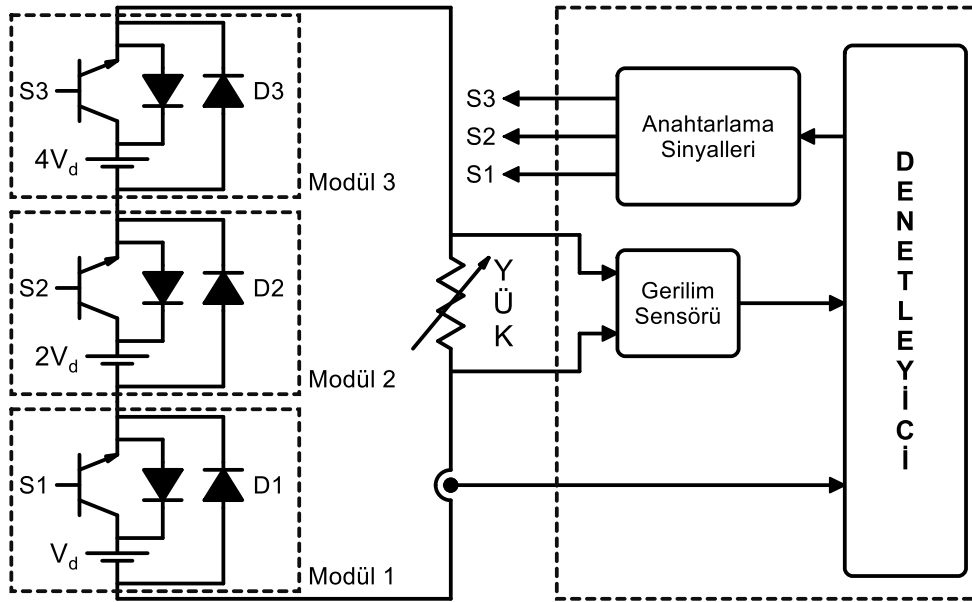
tip dönüştürücü [12] gibi yapıların FV simülatör elde edilmesinde kullanıldığı görülmüştür. Önerilen FV simülatör yapısı literatürde var olan yapıların aksine modüler bir yapıya sahiptir. Modüler yapısı sayesinde yüksek gerilimli ve yüksek güçlü uygulamalarda kullanılmaya uygundur. Ayrıca yapısı çok esnek olup tetiklemelerin elde edilmesi ve kontrolü kolaydır. Geliştirilen simülatör yapısı literatüre özgünlük açısından bir katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada; gerçek bir FV panele ait I-V ve P-V eğrilerini modellemek için bir FV simülatör yapısı önerilmiştir. Yapıdaki güç dönüştürücü kaskat bağlı modüllerden oluşmakta ve çok seviyeli gerilim dalga şekli üretmektedir. Kaskat modüllerin sayısı artırıldığında üretilen gerilimin seviye sayısı da artmaktadır. Önerilen FV simülatör yapısı, Bölüm 2'de detaylı olarak açıklanmıştır. Önerilen simülatörün performansını

göstermek için bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3'te simülasyon sonuçları verilmiş ve gerçek bir FV panele ait veriler ile karşılaştırılmıştır. Son olarak tüm çalışmanın sonuçları Bölüm 4'te değerlendirilmiştir.

2. ÖNERİLEN FV SİMÜLATÖR YAPISI (PROPOSED PV SIMULATOR STRUCTURE)

Önerilen FV simülatörün temel yapısı Şekil 1'de görülmektedir. Simülatör temel olarak birbirine benzer modüllerin kaskat bir şekilde seri bağlanmasından meydana gelmektedir. Modüller bir yarıiletken anahtarlama elemanı, bir diyot ve bir bağımsız doğru akım kaynağından oluşmaktadır.



Şekil 1. Önerilen FV simülatörün temel yapısı (The basic structure of proposed PV simulator)

FV simülatörde modül sayısı arttıkça üretilen gerilimin basamak sayısı (s) üstel olarak artmaktadır. Modül sayısı ne kadar fazla olursa, bir başka deyişle gerilimin basamak sayısı ne kadar çok olursa simülatörün I-V eğrisi modellenmek istenen FV panelin I-V eğrisine o kadar yakın olmaktadır.

Simülatör yapısında modül sayısına (m), bağlı olarak basamak sayısı (s) değişmektedir. Denklem (1)'de verilen formül yardımıyla modül sayısına bağlı olarak simülatörün basamak sayısı kolaylıkla bulunabilmektedir.

$$s = 2^m \quad (1)$$

Modül sayısına bağlı olarak hesaplanan gerilimin basamak sayısı, o modül sayısı için elde edilebilecek maksimum basamak sayısıdır. Şekil 1'de üç adet modülü bulunan 8 seviyeli FV simülatör yapısı verilmiştir. FV simülatör yapısından da görüldüğü gibi modüller birbirine kaskat seri bağlanarak sistem kolaylıkla genişleyebilmekte ve gerilimin basamak sayısı artırılabilir.

Simülatör çıkış geriliminin basamak sayısı ve çıkış geriliminin alabileceği maksimum değer bilindiği durumda birinci modülde kullanılacak kaynağın gerilimi (V_d) Denklem (2) kullanılarak

$$V_d = \frac{V_{max}}{s-1} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Birinci modülden sonra bağlanacak her modülde kullanılacak gerilim kaynağının değeri bir önceki modül geriliminin 2 katı olacaktır.

Basamak sayısına bağlı olarak kullanılacak modül sayısı (m), Denklem (3) kullanılarak bulunabilir.

$$m = \log_2(s) \quad (3)$$

Her bir modülde bulunan kaynağın gerilimi ise $2^{(k-1)}V_d$ formülü kullanılarak elde edilmektedir. Burada k modül numarası olup

$$k = 1,2,3, \dots, m \quad (4)$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Önerilen simülatör prensip olarak akım kontrollü gerilim kaynağı gibi çalışmaktadır. Başka bir ifadeyle gerçek FV panellerde olduğu gibi simülatörün çıkış gerilimi içinden geçen akıma göre değişmektedir. Ancak simülatörün çıkış gerilimi basamaklı bir gerilime benzemektedir.

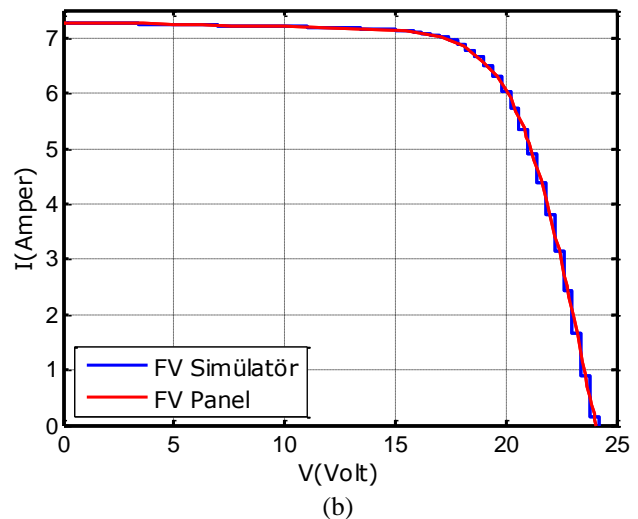
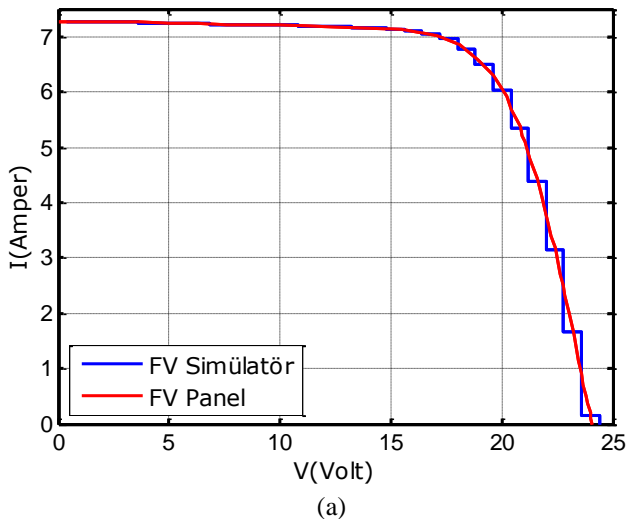
Sistemi çalıştırmadan önce ilk olarak modellenecek FV panelin I-V eğrisi verileri mikrodenetleyicinin içerisine yüklenmektedir. Daha sonra sistem çalıştırıldığında Şekil 1'deki yapıdan görüldüğü gibi simülatörün çıkış akımı sensör yardımıyla ölçülmektedir. Ölçülen bu değer mikrodenetleyici içinde bulunan analog dijital

dönüştürücü (ADC) tarafından okunmaktadır. Mikrodenetleyici içerisinde yer alan I-V eğrisi baz alınarak, okunan akım değerine karşılık gelen uygun gerilim değerini üretmek için tetikleme sinyalleri elde edilmektedir. Elde edilen tetikleme sinyalleri yarıiletken anahtarlama elemanlarına uygulandığında olması gereken gerilim değeri simülatör çıkışında oluşmaktadır.

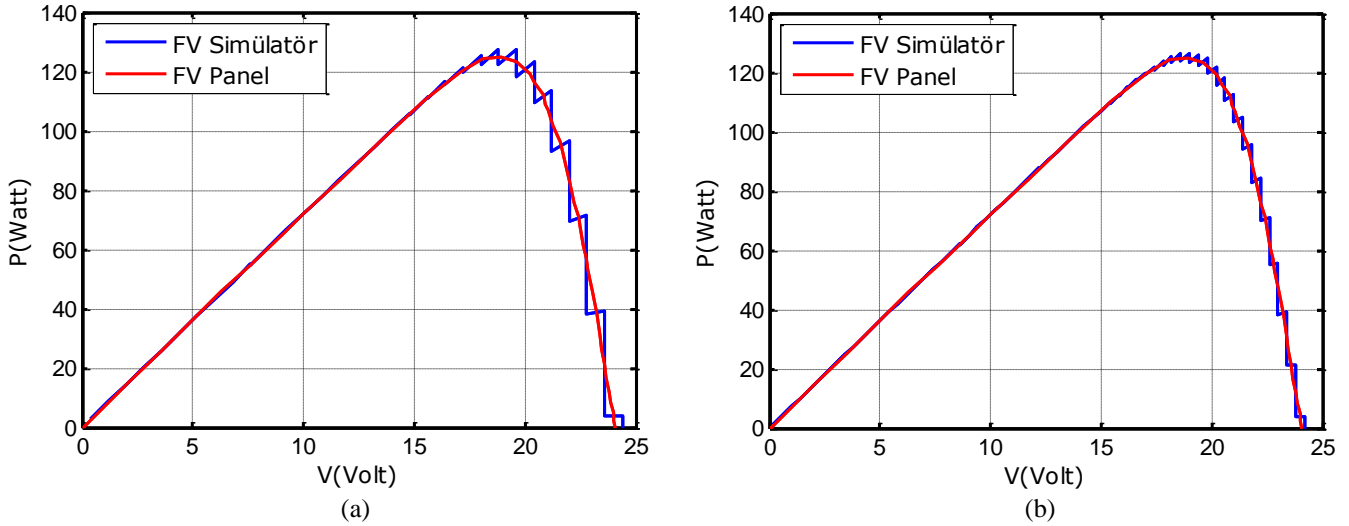
3. ÖNERİLEN FV SİMÜLATÖRÜN SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI (SIMULATION STUDY OF PROPOSED SIMULATOR)

Bu çalışmada Shüco S-125-SP FV panelin gerçek I-V değerleri kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlk olarak çalışmada kullanılan FV panelin I-V eğrisi verileri simülasyon programında oluşturulmuştur. Modül sayısına bağlı olarak V_d gerilimi hesaplanmış ve modüllerdeki doğru gerilim kaynakları bu değere göre ayarlanmıştır. FV panelin I-V eğrisindeki akım değerine karşılık simülatör çıkışında oluşması gereken gerilimi üretebilmek için tetikleme sinyalleri oluşturulmuştur.

Önerilen simülatörde; $1000W/m^2$ güneş ışınımı altında, 5 ve 6 modül kullanılarak gerilimin 32 ve 64 basamaklı olduğu durum için I-V eğrileri elde edilmiştir. Şekil 2' de bu duruma ait simülasyon sonuçları görülmektedir.



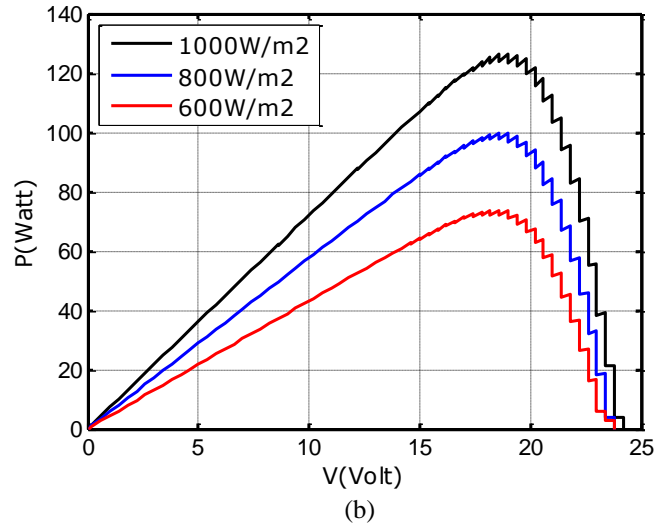
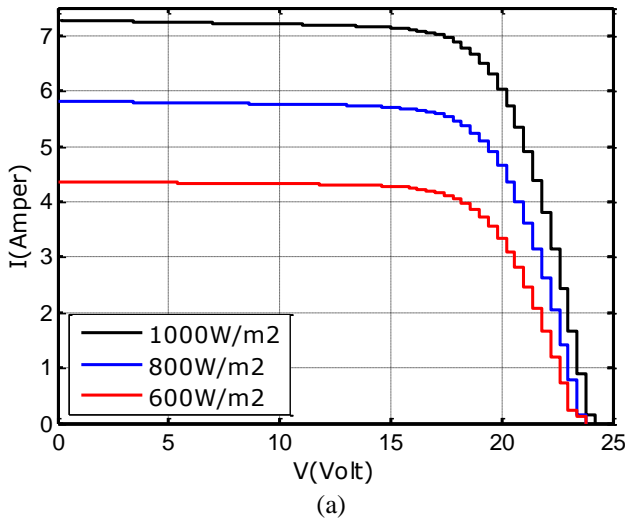
Şekil 2. Farklı modül sayıları için FV simülatörde elde edilen I-V eğrilerinin simülasyon sonuçları
a) 5 modül durumu b) 6 modül durumu
(Simulation results of I-V curves generated in the PV simulator for different module number
a) 5 modules b) 6 modules)



Şekil 3. Farklı modül sayıları için FV simülatörde elde edilen P-V eğrilerinin simülasyon sonuçları
a) 5 modül durumu b) 6 modül durumu
(Simulation results of P-V curves generated in the PV simulator for different module number
a) 5 modules b) 6 modules)

Simülasyon çalışmalarında, I-V eğrilerinin yanı sıra FV panelin P-V eğrileri de elde edilmiştir. Şekil 3'te $1000\text{W}/\text{m}^2$ güneş ışınımı altında, 5 ve 6 modül durumu için FV simülatörde elde edilen P-V eğrileri görülmektedir.

Önerilen simülatörde, modül sayısı arttıkça çıkış geriliminin basamak sayısı üstel olarak artmaktadır. Şekil 2 ve Şekil 3'ten görüldüğü gibi basamak sayısı arttıkça da simülatör I-V ve P-V eğrileri modeli oluşturulan FV panelin gerçek eğrilerine daha çok benzemektedir.

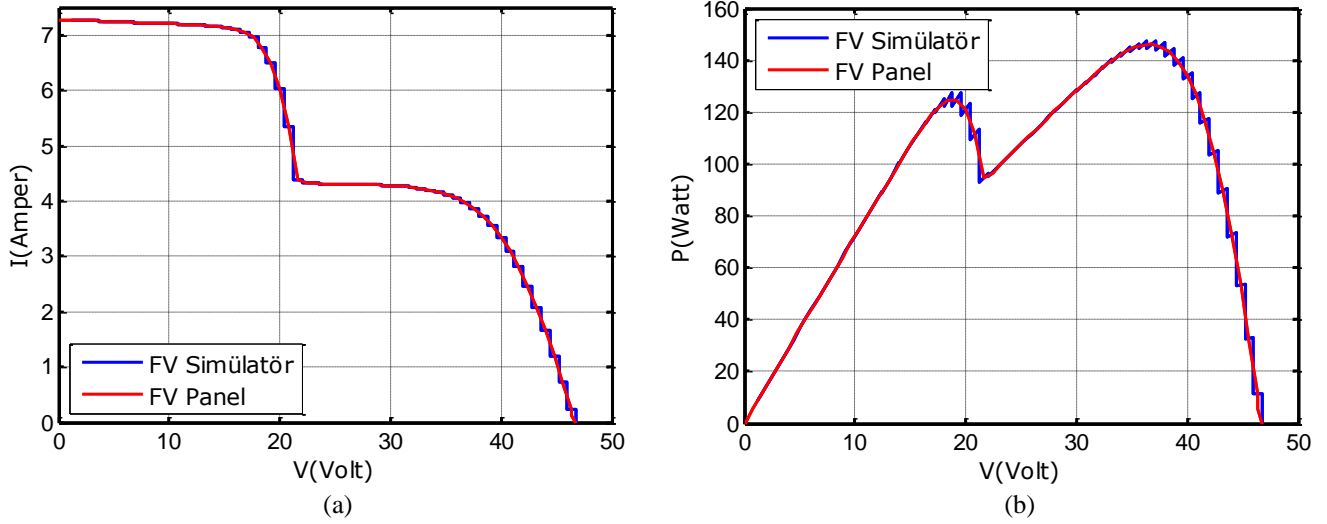


Şekil 4. 6 modüllü FV simülatöre ait farklı güneş ışınma durumları için elde edilen simülasyon sonuçları
a) I-V eğrileri b) P-V eğrileri
(Simulation results of PV simulator having 6 modules for different solar irradiance values
a) I-V curves b) P-V curves)

Simülasyon çalışmasında farklı ışınma değerleri için de I-V ve P-V eğrileri elde edilmiştir. Şekil 4'te 6 modüllü FV simülatörde farklı ışınma değerleri için elde edilen eğriler görülmektedir.

Bu çalışmada son olarak önerilen FV simülatör ile parçalı gölgeleme durumunun da modellenebileceğini göstermek amacıyla parçalı gölgeleme durumu için de bir simülasyon çalışması yapılmıştır.

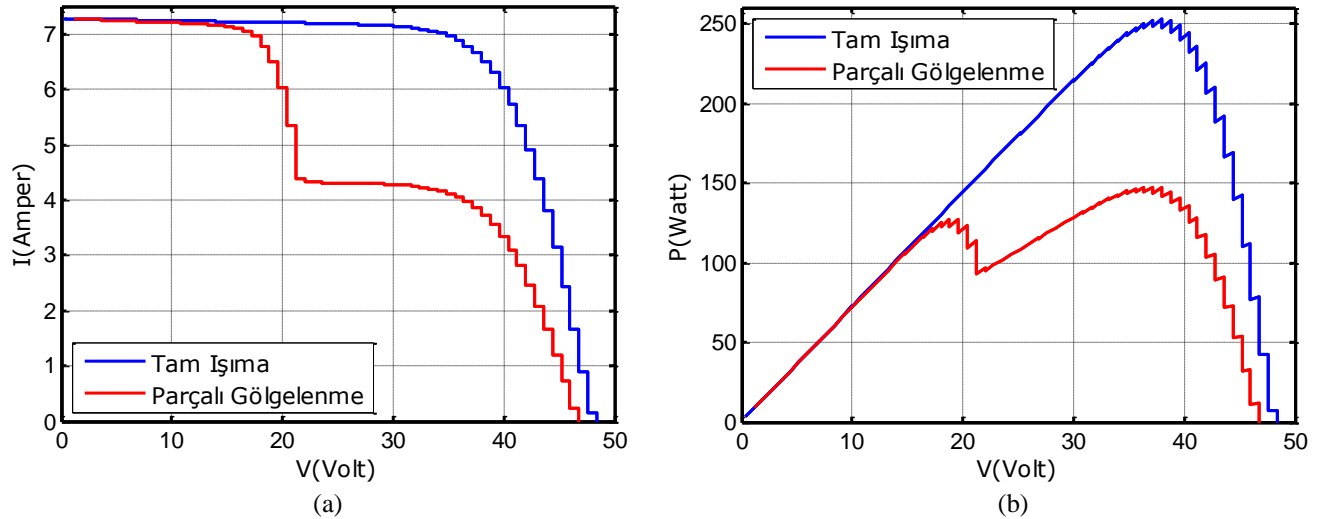
Bu amaçla; aynı özelliklere sahip iki Shüco S-125-SP FV panelin seri bağlanması halinde ve birinci panelin $1000\text{W}/\text{m}^2$, ikinci panelin $600\text{W}/\text{m}^2$ ışınma altında olması durumu düşünülerek bu durum için I-V ve P-V eğrileri elde edilmiştir. Şekil 5'te yukarıda anlatılan parçalı gölgeleme durumu için 6 modüllü FV simülatörde elde edilen eğriler görülmektedir.



Şekil 5. 6 modüllü FV simülatörde, parçalı gölgelenme durumuna ait simüstasyon sonuçları
a) I-V eğrileri b) P-V eğrileri
(Simulation results of PV simulator having 6 modules for partial shaded condition
a) I-V curves b) P-V curves)

Ayrıca parçalı gölgelenme durumunun daha iyi anlaşılması açısından seri bağlı iki panelin her ikisinin de $1000\text{W}/\text{m}^2$ ışımada olduğu durum için de simüstasyon çalışması yapılmış ve bu çalışmaya ait I-V ve P-V eğrileri elde edilmiştir. Seri bağlı iki panelin her ikisinin de $1000\text{W}/\text{m}^2$ ışımada olduğu durumu gösteren I-V eğrisi Şekil 6 (a)'da verilmiştir. Ek olarak karşılaştırma

olması açısından, panellerden birinin $600\text{W}/\text{m}^2$ ışımada olması durumunda elde edilen I-V eğrisi de Şekil 6 (a)'da aynı eksen takımında görülmektedir. Aynı durumlar için elde edilen P-V eğrileri de Şekil 6 (b)'de verilmiştir.



Şekil 6. 6 modüllü FV simülatörde, tam ışımada ve parçalı gölgelenme durumunda elde edilen simüstasyon sonuçları
a) I-V eğrileri b) P-V eğrileri
(Simulation results of PV simulator having 6 modules for full radiation and partial shaded condition
a) I-V curves b) P-V curves)

Simüstasyon sonuçları önerilen FV simülatör yapısı ile parçalı gölgelenme durumlarının da laboratuvar ortamında oluşturabildiğini göstermektedir. Tüm simüstasyon sonuçları değerlendirildiğinde geliştirilen FV simülatör, araştırmacıların tasarladıkları maksimum güç izleme algoritmalarını veya maksimum güç izleyici devrelerini laboratuvar ortamında kolaylıkla,

gerçeğe yakın olarak ve tekrarlanabilir koşullarda test edebilmesine imkan sağlamaktadır.

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, FV panellerin modellenmesi için geliştirilen yeni bir simülatör yapısı önerilmiştir. Önerilen yapı ayrıntılı olarak tanıtılmış,

simülasyon çalışması gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçları modellenen gerçek FV panelin verileri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yapı çok seviyeli bir yapı olup FV simülatör konusunda literatüre yeni bir yaklaşım kazandırmıştır. Önerilen simülatörün yapısı çok esnek olup tetiklemelerin elde edilmesi ve kontrolü kolaydır. Modül sayısı artırılarak sistemin hassasiyeti artırılmakta ve sonuçlar modellenen gerçek FV panel eğrilerine daha çok benzemektedir. Ayrıca modül sayısı artırıldığı zaman gerilim seviyesi ihtiyaca bağlı olarak yükseltilebilmektedir. Bu sayede önerilen sistem yüksek gerilimli FV panel modellenmesinin gerektiği uygulamalarda rahatlıkla kullanılabilir. Yüksek gerilimli uygulamalarda kullanılabilen bir yapı olduğu için şebeke senkronizasyonlu FV panel çalışmalarında önerilen sistem tercih edilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] C. H. Chang, E. C. Chang and E. L. Cheng, "A High-Efficiency Solar Array Simulator Implemented by an LLC Resonant DC-DC Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 6, pp. 3039-3046, 2013
- [2] H. Lee, M. J. Lee, S. N. Lee, H. Lee, H. Nam and S. Park, "Development of Photovoltaic Simulator based on DC-DC Converter," in *International Telecommunications Energy Conference - INTELEC*, 2009.
- [3] A. Koran, K. Sano, R. Y. Kim and J. S. Lai, "Design of a Photovoltaic Simulator with a Novel Reference Signal Generator and Two-Stage LC Output Filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 5, pp. 1331-1338, 2010.
- [4] Z. G. Piao, S. J. Gong, Y. H. An and G. B. Cho, "A Study on the PV Simulator using Equivalent Circuit Model and Look-up Table Hybrid Method," in *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2013.
- [5] C. H. Chang, C. A. Cheng and H. L. Cheng, "Modeling and Design of the LLC Resonant Converter Used as a Solar-Array Simulator," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, no. 4, pp. 833-841, 2014.
- [6] J. P. Lee, B. D. Min, T. Kim and J. Kim, "Development of a Photovoltaic Simulator with Novel Simulation Method of Photovoltaic Characteristics," in *31st International Telecommunications Energy Conference - INTELEC*, 2009.
- [7] H. Qi, Y. Bi and Y. Wu, "Development of Photovoltaic Array Simulator Based on Buck Converter," in *International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering - ISEEE*, 2014.
- [8] Y. Li, T. Lee, F. Z. Peng and D. Liu, "A Hybrid Control Strategy for Photovoltaic Simulator," in *Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC*, 2009.
- [9] P. Vongkoon and P. Liutanakul, "Digital R-S-T Controller for Current Loop Control of DC/DC Buck Converter: A Photovoltaic (PV) Array Simulator under Partial Shading Condition," in *9th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology - ECTI-CON*, 2012.
- [10] J. Zhao and Z. W. Kimball, "A Digitally Implemented Photovoltaic Simulator with a Double Current Mode Controller," in *Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics and Exposition - APEC*, 2012.
- [11] A. F. Cupertino, G. V. Santos, H. A. Pereira, S. Silva and V. Mendes, "Modeling and Control of a Flexible Photovoltaic Array Simulator," in *IEEE 24th International Symposium on Industrial Electronics - ISIE*, 2015.
- [12] D. D. C. Lu and Q. Y. Nguyen, "A photovoltaic panel emulator using a buck-boost DC/DC converter and a low cost micro-controller," *Solar Energy*, pp. 1477-1484, 2012.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 03.11.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 01.04.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.348993	

hBN-SiC kompozitlerde sıcaklığın SiC tane boyutuna etkisi**

Zuhal Yılmaz^{*1}, Nuran Ay²

ÖZET

Bu çalışmada hekzagonal bor nitrür- silisyum karbür (hBN-SiC) kompozit sentezinde sıcaklığın SiC tane boyutu üzerine etkisi araştırılmıştır. Numunelerin SPS ile 1700°C, 1800°C, 1900°C ve 2000°C’de farklı sıcaklıklarda 50MPa basınç altında 15dak sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sıcaklığının SiC tane boyutu üzerine etkisinin belirlenmesi için ImageJ programı ile tane boyut ölçümleri gerçekleştirilerek normal dağılım fonksiyonu ile tane boyut dağılımları tespit edilmiştir. 1700°C’den 1900°C’ye sıcaklık artırıldığında h-BN miktarında %0,9’luk bir artış gözlenmiştir ve 2000°C’de ise değişmemiştir. SiC ortalama tane boyutu 1700°C’den 2000°C’ye sıcaklık artırıldığında 1,09µm’den 1,96µm’ye artmıştır. Tane boyut dağılımlarının standart sapma değerleri ise 1700°C’de 0,445 iken 2000°C’de 0,812 değerine arttığı gözlenmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak tane boyut dağılımı artmaktadır. hBN fazının güçlü kovalent bağları ve plaka şeklinde yapıya sahip olmasından dolayı hBN’nin zayıf sinterlenebilitesi nedeniyle SiC tane büyümesini yavaşlattığı söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: hBN; SiC; kompozit; SPS; tane boyutu

Effect of temperature on SiC grain size in hBN-SiC composites

ABSTRACT

In this study, the effect of temperature on the SiC grain size was investigated in the synthesis of hexagonal boron nitride-silicon carbide (hBN-SiC) composites. Samples were sintered at 1700°C, 1800°C, 1900°C and 2000°C, under 50MPa pressure for 15 minutes by spark plasma sintering (SPS). In order to determine the effect of sintering temperature on the SiC grain size, grain sizes were measured by ImageJ program. Grain size distributions were determined by using normal distribution function. When the temperature was increased from 1700°C to 1900°C, the amount of h-BN increased by 0.9% and remained unchanged at 2000°C. When the temperature was increased from 1700°C to 2000°C, the average grain size of SiC increased from 1.9 µm to 1.96 µm. The standard deviation values of grain size distribution increased from 0,445 at 1700°C to 0,812 at 2000°C. Depending on the temperature, the grain size distribution has increased. Due to the strong covalent bonds and plate-like structure of hBN, it has poor sinterability. Because of this feature, it can be said that the growth of SiC grains is slowed down by hBN.

Keywords: hBN, SiC, composite, SPS, grain size

¹ Bilecik Şeyh Edabali Üniversitesi, zuhal.guven@bilecik.edu.tr

* Corresponding Author

² Anadolu Üniversitesi, nay@anadolu.edu.tr

** Bu makale "Bor Nitrür Silisyum Karbür Kompozitlerin Sentezi ve Özelliklerinin Araştırılması" adlı doktora tezinden üretilmiştir.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Silisyum karbür (SiC) yüksek sıcaklıklarda yüksek sertlik ve mukavemet, kimyasal ve ısıl kararlılık, yüksek erime noktası, oksitlenme direnci, yüksek aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı endüstride kullanılan önemli seramik malzemelerinden biridir [1-3]. Literatürde hBN-SiC kompozit çalışmaları ile ilgili genellikle SiC ve hBN'nin birlikte sentezlendiği yerinde sentez (in Situ) yöntemi kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda Si_3N_4 , B_4C ve C kullanılarak [4-7], Si_3N_4 , H_3BO_3 ve C'un kimyasal reaksiyonu sonucu [8] ve SiO_2 , H_3BO_3 ve C kullanılarak hBN-SiC kompozit elde etmişlerdir[9]. Literatürde ayrıca H_3BO_3 ve $CO(NH_2)_2$ kullanılarak hBN'ün α -SiC veya β -SiC içerisinde kimyasal yöntem kullanılarak sentezlendiği kompozit çalışmalar mevcuttur [10-13]. Ancak bu çalışmalarda SiC tane boyutu ile ilgili bulgulara rastlanmamıştır.

SiC'ün tane boyutunun sıcaklığa göre değişimi ile ilgili literatür incelendiğinde Guillard ve arkadaşları 1750–1850°C aralığında farklı sıcaklıklarda, 1-10 dak aralığında farklı sürelerde, 75MPa sinterleme esnasında ve 1000°C'den itibaren 75MPa basınç uygulamaya başlayarak iki farklı basınç eğrisi kullanarak yaptıkları çalışmada SiC'ün (başlangıç tane boyutu 0,5 μ m) yoğunlaşma davranışını incelemişlerdir. Sinterlemede SPS yöntemi kullanılmıştır. SiC'ün 1850°C'de 5 dak ve 75 MPa'ın altında % 92'ye kadar yoğunlaştığını tespit etmişler ve 1800°C'ye kadar bu koşullarda tane morfolojisi ve boyutunda kayda değer bir değişim olmadığını ifade etmişlerdir. Sıcaklık ve bekleme süresi arttıkça tane boyutunun arttığını belirlemişlerdir [14].

Tanaka ve Zhou 6H-SiC kullanarak, AlB_2 ve C sinterleme ilavesi yaparak sinterledikleri çalışmada farklı sıcaklık ve sinterleme ilaveleri kullanarak denemeler yapmışlardır. Tozlar 200 MPa'da CIP (soğuk izostatik presleme) ile sıkıştırılmış ve karbon fırınında numuneler önce bir vakum atmosferinde oda sıcaklığından 1500°C'ye kadar ısıtılmış ve sonra Ar atmosferinde 30 dakika boyunca 1850-2150°C aralığında sinterlenmiştir. AlB_2 ve C katkılarının, 1800°C'nin altında eriyen bir $Al_8B_4C_7$ bileşiği oluşturduğu bunun ise sinterleme ve tane büyümesini arttırdığı belirlenmiştir. Ayrıca sinterleme sırasında, 6H-SiC kısmen 4H-SiC'ye dönüştüğü ve dönüşümün tanelerin büyümesine ve küresel olmayan bir şekle dönüşmesine neden olduğu

ifade edilmiştir. [15]. Lee ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada nano boyutta β -SiC tozları, % 6 oranında Al_2O_3 ve Y_2O_3 sinterleme ilavesi kullanarak 1300-1900°C aralığın da 20MPa basınç altında sıcak presleme ile sinterlenmiş ve sıcaklığa bağlı olarak tane boyutunda artış miktarının yavaş olduğu sinterleme sıcaklığında sürenin uzatılması sonucu tane boyutunda daha fazla artış olduğu tespit edilmiştir [16].

Zhan ve arkadaşlarının 90nm tane boyutuna sahip β -SiC kullanarak yaptıkları çalışmada ağırlıkça %7 Al_2O_3 , %2 Y_2O_3 ve %1,785 $CaCO_3$ sinterleme ilavesi ve %2,7 oranında α -SiC ilavesi yaparak hazırladıkları toz karışımı Ar atmosferinde 25 MPa'lık bir basınç altında 1750°C'de 40 dakika süreyle sıcak preslenmiştir. Sıcak preslenmiş malzemeler daha sonra, 25 MPa basıncın altında veya basınç uygulanmadan 4 saat boyunca 1800°C ile 1950°C arasında değişen çeşitli sıcaklıklarda sinterlenmiştir. Basınca maruz kalmış numunede β -SiC'den α -SiC'ye faz dönüşümleri hacimce %30'un altında iken, basınçsız tavllanmış numunelerde faz dönüşüm miktarı %30'un üzerinde ve uzunlamasına taneler ile mikro yapıların geliştiği, basınçla tavllanmış numunelerin eşit eksenli tanelerle ince bir mikroyapıya sahip olduğu ifade edilmiştir [17].

Bu çalışmada α -SiC, H_3BO_3 ve $CO(NH_2)_2$ kullanarak hBN-SiC kompozitler sentezmiş ve SPS yöntemi ile farklı sıcaklıklarda sinterlenmesi sonucunda sıcaklığın kompozit malzemede SiC tane boyutuna etkisi araştırılmıştır.

2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPIREMENTAL PROCEDURE)

α -SiC (Alfa Aesar, Germany, %99,8 saflıkta), borik asit (H_3BO_3) (Merck, Germany) ve üre ($CO(NH_2)_2$) (Merck, Germany, \geq %99,5 saflıkta) deneylerde kullanılan hammaddelerdir. Alümina (Al_2O_3) (Chempur, Germany, %99 saflıkta) ve yitriyum oksit (Chempur, Germany, %99,95 saflıkta) sinterleme ilavesi olarak kullanılmıştır. Ağırlıkça teorik olarak %10 BN oluşacak oranda hazırlanan ve azot atmosferinde 850°C'de 16 saat tüp fırında (Protherm Furnaces) ısıl işlem uygulanmış α SiC-BN kompozit toz karışımına kalsinasyon sonrasında ağırlıkça %10 Al_2O_3 ve Y_2O_3 ($Al_2O_3:Y_2O_3$ 'in ağırlıkça oranı 7:3) sinterleme ilaveleri yapılmıştır. Kompozit toz karışımlarının Spark Plazma Sinterleme (SPS) (FCT GmbH) yöntemi ile 50 MPa basınç 1700°C, 1800°C, 1900°C ve 2000°C sıcaklıklarda 15 dak

süre ile sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kodları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Numunelerin kodlanması (Samples code)

Numune Kodu	Sinterleme sıcaklığı(°C)
S2-A7Y3-1700	1700
S2-A7Y3-1800	1800
S2-A7Y3-1900	1900
S2-A7Y3-2000	2000

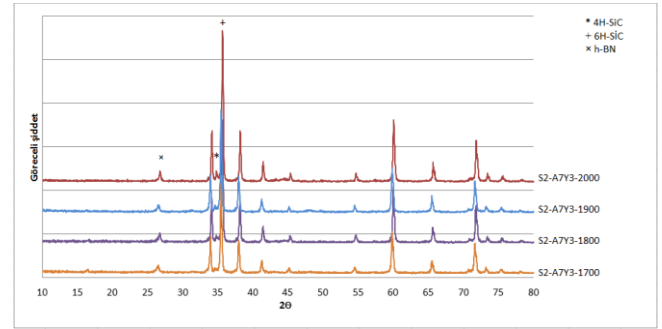
Sinterlenmiş numunelerin karakterizasyonlarında XRD (Rikagu Rint 2000) ve SEM (Zeiss Supra 50VP) kullanılmıştır. Arşimet düzeneği kullanılarak yoğunlukları, su emmeleri ölçülmüştür. Sertlikleri vickers sertlik cihazı (emco TEST M1C 010) kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerdeki fazlarının miktarları (kantitatif XRD analizi) Maud programı ile Rietveld metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Sinterleme sıcaklığının SiC tane boyutu üzerine etkisinin belirlenmesi amacı ile tane boyutu ölçümü için her numune hassas parlatma cihazında (Struers Tegra Pol-25) parlatılmış ve SEM ile aynı koşullarda farklı bölgelerden INLENS-BSD görüntüleri alınmıştır ve ImageJ programı ile tane boyutları ölçülmüştür. SEM görüntülerinden 300 adet tanenin x ve y eksenini boyunca ölçümü gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1.Karakterizasyon(Characterization)

S2-A7Y3 numunesinin 1700°C, 1800°C, 1900°C ve 2000°C’de SPS ile 50MPa basınç ve 15 dak süre ile sinterlenmesi sonucu elde edilen XRD paternleri Şekil 1’de verilmiştir. Bütün numunelerde başlangıç SiC fazlarının (4H-SiC (JCPDS PDF No: 022-1317) ve 6H-SiC (JCPDS PDF No: 075-8314)) korunduğu ve JCPDS PDF No: 034-0421 nolu hBN yapısının oluştuğu tespit edilmiştir. hBN pik şiddetlerinin hemen hemen birbirine yakın olduğu belirlenmiş. Şekil 2’de SEM görüntüsünde 1700-2000°C aralığında bütün numunelerde hBN partikülleri tespit edilmiştir. Literatürde hBN oluşumunun 1500°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleştiği belirtilmektedir [18-20]. Hubacek ve ark. yaptıkları çalışmada bor nitrürün 1300°C’ye ısıtıldığında turbostratik, 1300-1600°C arasında

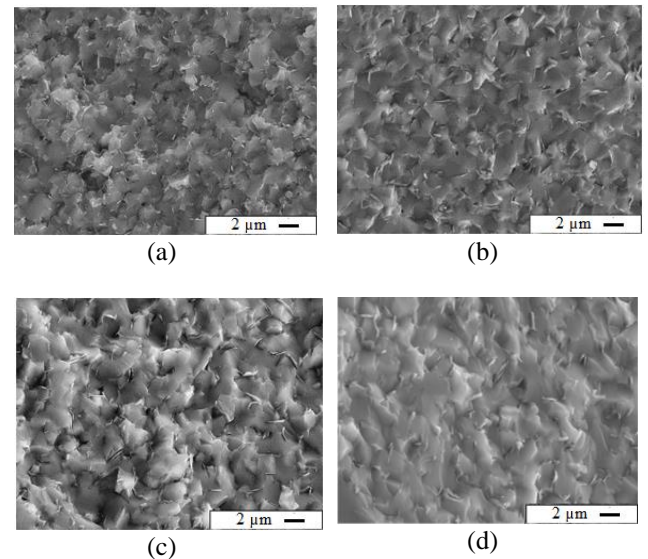
mezografitik, 1600°C üzerinde ise kristalin hegzagonal yapıda olduğunu belirtmişlerdir [21].



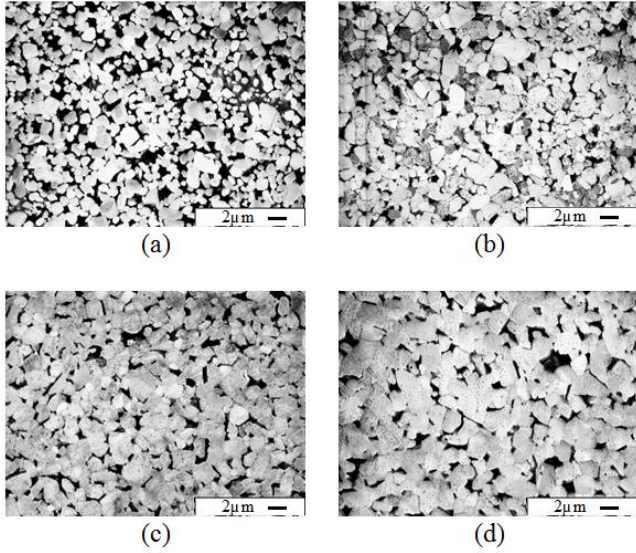
Şekil 1. 1700°C, 1800°C, 1900°C ve 2000°C’de SPS sonrası S2-A7Y3 numunesine ait XRD paternleri (XRD paterns of the S2-A7Y3 sample after SPS at 1700°C, 1800°C, 1900°C and 2000°C)

3.2. SiC tane boyutu değişimi (Change in grain size of SiC)

S2-A7Y3 numunesinin 1700°C, 1800°C, 1900°C ve 2000°C’de SPS ile 50MPa basınç ve 15 dak süre ile sinterlenmesi sonucu elde edilen numunelerden x-eksenini boyunca alınan kesitten hassas parlatma cihazı sonrası parlak yüzey INLENS-BSD mix SEM görüntüleri Şekil 3’de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde SiC tane boyutlarının sıcaklığa bağlı olarak arttığı açıkça görülmektedir.

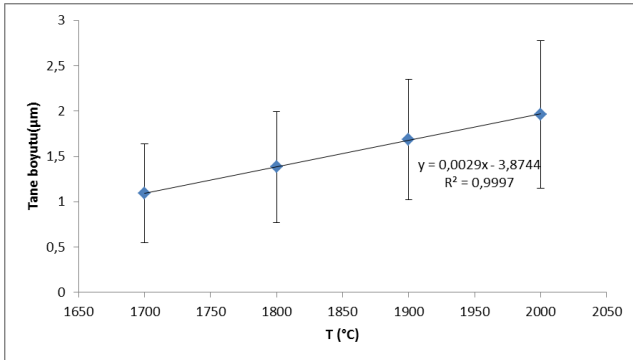


Şekil 2. Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem görmüş S2-A7Y3 numunesine ait SE-SEM görüntüleri a) 1700°C, b) 1800°C, c) 1900°C ve d) 2000°C sıcaklıkta (SE-SEM images of the samples S2-A7Y3 which were heat-treated at different temperatures a) 1700°C, b) 1800°C, c) 1900°C and d) 2000°C)



Şekil 3. Farklı sıcaklıklarda ısıl işlem görmüş S2-A7Y3 numunesine ait parlak yüzey INLENS-BSD SEM görüntüleri a) 1700°C, b) 1800°C, c) 1900°C ve d) 2000°C sıcaklıkta (INLENS-BSD SEM images of the samples S2-A7Y3 which were heat-treated at different temperatures a) 1700°C, b) 1800°C, c) 1900°C and d) 2000°C)

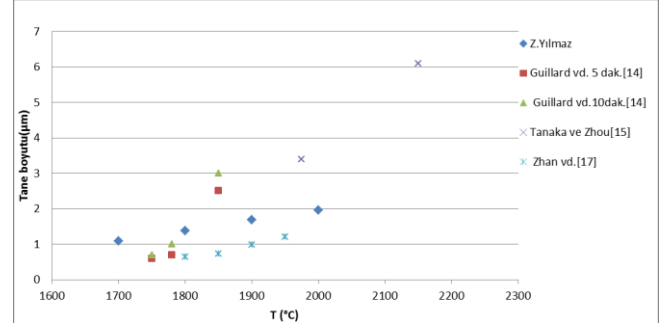
Tane boyutu ölçümü sonucu elde edilen verilerden her bir sıcaklık için α -SiC tanelerinin ortalama tane boyutları hesaplanarak sıcaklığa karşı tane boyutundaki değişim belirlenmiştir (Şekil 4). Reaksiyon hız sabiti ise grafiğin eğiminden 0,0029 olarak hesaplanmıştır. Artan sıcaklığa bağlı olarak SiC tane boyutunda artma gözlenmiştir.



Şekil 4. S2-A7Y3 numunesinin sıcaklık-tane boyutu değişimi (Temperature-particle size change of sample S2-A7Y3)

Yapılan çalışmanın literatür verileri ile karşılaştırılması için SiC'ün tane boyutunun sıcaklığa göre değişimi ile ilgili literatür örneklerinden alınan veriler ile yapılan çalışmanın tane boyutu verileri kullanılarak tane boyutunun sıcaklığa bağlı değişim grafiği çizilmiştir (Şekil 5). Guillard ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmanın 5 ve 10 dak süre ile sinterlenmiş 1000°C'den itibaren 75MPa basınç uygulanarak yapılmış olan çalışmaların tane boyutları [14], Tanaka ve Zhou'nun yapmış olduğu çalışmanın

aynı oranda sinterleme ilavesi yapılmış (% 2,7AlB₂ ve %2 C) numunelerinin tane boyutları değerleri [15] ve Zhan ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada 25 MPa basıncın altında sinterlenen numunelerin tane boyutları değerleri kullanılarak [17] tane boyutu grafikleri çizilmiştir.



Şekil 5. Literatür çalışmalarından alınan örnekler ve S2-A7Y3 numunesinin sıcaklığa bağlı tane boyutu değişimi (Temperature-particle size change of examples from literature studies and sample S2-A7Y3)

Şekil 5 incelendiğinde Guillard ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada SiC tane boyutunda 1800°C'ye kadar kayda değer bir değişim görülmez iken 1850°C'de 2-2,4 µm'ye kadar attığı belirlenmiştir. 1780°C'de, tutma süresi yaklaşık 1 ila 10 dakika aralığında iken tane boyutu yaklaşık %40 artarken, 5 dak. tutma süresinde sıcaklık 1750°C'den 1850°C'ye arttığında tane boyutunun yaklaşık %200 arttığını tespit etmişlerdir [14]. Bu sonuç grafikte net olarak görülmektedir. Bu sonuçlardan yola çıkarak tane büyümesinde sinterleme sıcaklığının sinterleme süresinden çok daha etkili olduğu ifade edilmiştir. Tanaka ve Zhou'nun yaptıkları çalışmada (Şekil 5) 1975°C'de sıcaklıkta tane boyutu 3,1µm iken 2150°C'de neredeyse %100'lük bir artış ile 6,1µm'ye artmıştır [15]. Şekil 5 incelendiğinde Zhan ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada basınç ile sinterlenmiş olan numunede 1800°C'de ~0,6µm olan tane boyutunun 1950°C'de %100'lük bir artışla ~1,2µm'ye arttığı belirlenmiştir [17].

Yapılan çalışmada %7Al₂O₃-%3Y₂O₃ sinterleme ilavesi içeren S2-A7Y3 numunesinin 50 MPa basınç ve 15dak süre ile sinterlenmiş numunelerinde 1700°C'de ortalama tane boyutu 1,09µm iken bu değer 1800°C'de 1,38µm'ye, 1900°C'de 1,68µm'ye, 2000°C'de ise 1,96µm'ye yükselmiştir. Bu sonuç tane büyümesinin bu numunelerde literatürdeki verilere göre daha düşük olduğunu göstermektedir (Şekil 5). Bu numunelerde %6,12-7,02 aralığında hBN bulunmaktadır (Tablo 2). Literatürde tane sınırlarındaki hBN tabakalarının SiC'nin tane

büyümesini engellediği ve muhtemelen bunun hBN fazının bir perkolasyon ağı oluşturmasından [22] ve hBN fazının güçlü kovalent bağları ve plaka şeklinde yapıya sahip olmasından dolayı hBN'nin zayıf sinterlenebilitesi nedeniyle tane büyümesini engellediği ifade edilmektedir [23]. Ölçülen sonuçlara göre hBN tabakalarının SiC tane büyümesini yavaşlattığı söylenebilir.

S2-A7Y3 numunelerinin normal dağılım fonksiyonu (Eşitlik 1) kullanılarak tane boyut dağılım grafikleri çizilmiştir (Şekil 6).

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

Bu fonksiyondaki;

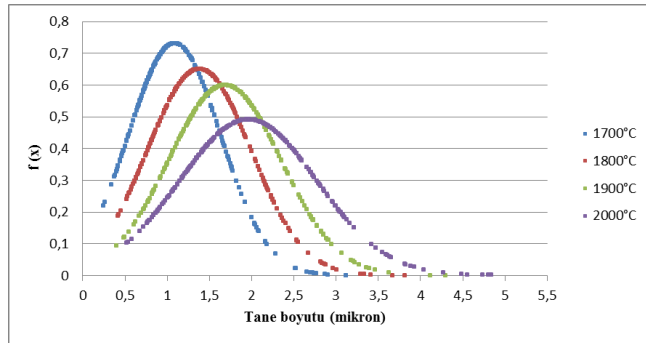
e: ~2.71828'e eşit matematiksel sabit

π : ~3.14159'a eşit matematiksel sabit

μ : anakütle ortalaması

σ : anakütle standart sapması

x: herhangi bir sürekli tesadüfi değişkendir.



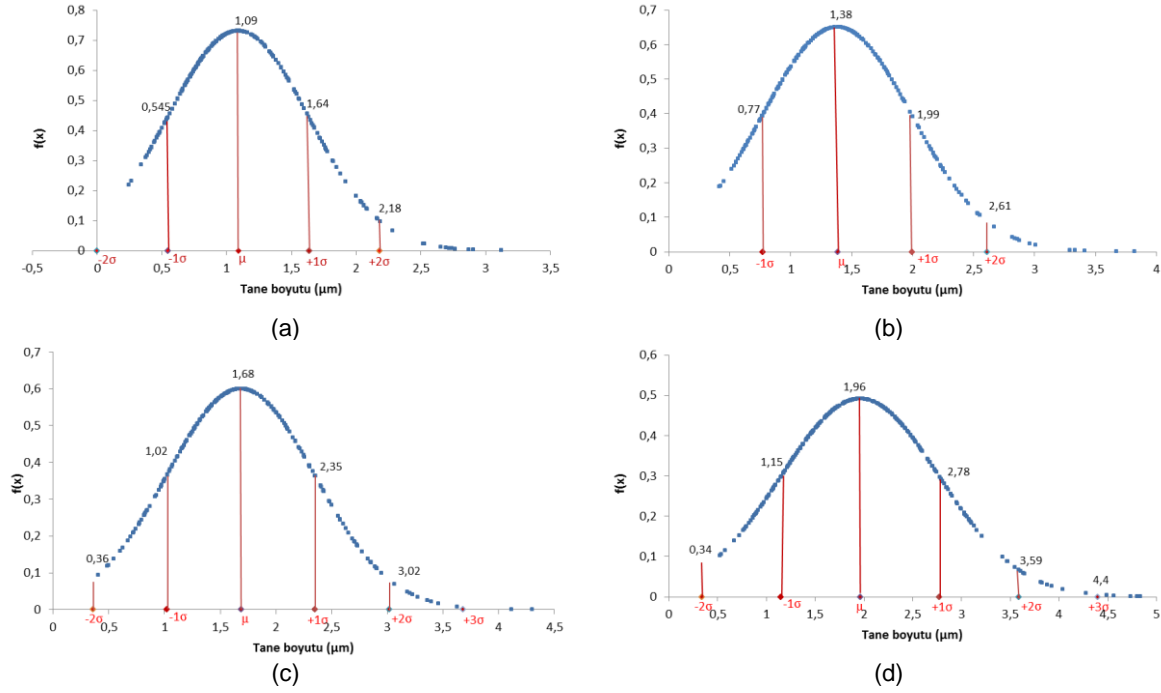
Şekil 6. Farklı sıcaklıklarda sinterlenen S2-A7Y3 numunesinin SiC tane boyut dağılımı (SiC grain size distribution of the samples S2-A7Y3 which were sintered at different temperatures)

SiC tane boyut dağılımlarının normal dağılım fonksiyonlarının grafiği incelendiğinde sıcaklığa bağlı olarak tane boyutunun ve tane boyut dağılım aralığının arttığı belirlenmiştir. 1700°C'de tane boyutları birbirine daha yakın iken sıcaklık arttıkça tane boyutları farklılaşmakta ve 2000°C'de bu fark daha da fazladır.

Pratikte, çok zaman verilerin yaklaşık olarak bir normal dağılım gösteren ana kütlede geldiği varsayılır. Bu varsayıma neden olarak merkezsiz limit teoreminin geçerliliği iddiası olur. Merkezi

limit teoremine göre birçok birbirinden bağımsız ve hepsi aynı dağılım gösteren rassal değişkenlerin toplamı limitte bir normal dağılıma göre eğilim gösterirler. Eğer bu varsayım geçerli ise, değerler yaklaşık %68,27 olasılıkla ortalamadan eksi ve artı bir standart sapma ($\pm 1\sigma$) noktalarının arasında bulunur; ortalamadan artı ve eksi 2 standart sapma ($\pm 2\sigma$) noktaları arasında %95,45 olasılıkla ve ortalamadan artı ve eksi 3 standart sapma ($\pm 3\sigma$) noktaları arasında %99,73 olasılıkla bulunur.

Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş S2-A7Y3 numunesinin SiC tane boyut dağılımı fonksiyon grafikleri Şekil 7'de verilmiştir. 1700°C'de sinterlenmiş olan S2-A7Y3 numunesinin (Şekil 7-a) ortalama tane boyutu İmageJ programından elde edilen verilere göre hesaplanmış ve 1,09µm olarak belirlenmiştir. Standart sapma değeri ise 0,546'dır. +1σ değeri 1,64µm -1σ değeri ise 0,545µm olarak hesaplanmıştır. Bu durumda yaklaşık %68,27 olasılıkla taneler 0,545 ve 1,64µm tane boyut aralığındadır. +2σ değeri ise 2,18µm olarak hesaplanmıştır ve %95,45 olasılıkla numunenin tane boyutu 2,18µm'nin altındadır. 1800°C'de sinterlenmiş olan S2-A7Y3 numunesinin (Şekil 7-b) ortalama tane boyutu 1,38µm olarak belirlenmiştir. Standart sapma değeri ise 0,613'dür. +2σ değeri ise 2,61µm olarak hesaplanmıştır ve %95,45 olasılıkla numunenin tane boyutu 2,61µm'nin altındadır. 1900°C'de sinterlenmiş olan S2-A7Y3 numunesinin (Şekil 7-c) ortalama tane boyutu 1,68µm olarak belirlenmiştir. Standart sapma değeri ise 0,665'dir. +2σ değeri ise 3,02µm, -2σ değeri ise 0,36µm olarak hesaplanmıştır ve %95,45 olasılıkla numunenin tane boyutu 0,36 ve 3,02 µm tane boyut aralığındadır. +3σ değeri ise 3,68µm olarak hesaplanmıştır ve %99,73 olasılıkla numunenin tane boyutu 3,68µm'nin altındadır. 2000°C'de sinterlenmiş olan S2-A7Y3 numunesinin (Şekil 7-d) ortalama tane boyutu 1,96µm olarak belirlenmiştir. Standart sapma değeri ise 0,812'dir. +2σ değeri ise 3,59µm, -2σ değeri ise 0,34µm olarak hesaplanmıştır ve %95,45 olasılıkla numunenin tane boyutu 0,34 ve 3,59 µm tane boyut aralığındadır. +3σ değeri ise 4,4µm olarak hesaplanmıştır ve %99,73 olasılıkla numunenin tane boyutu 4,4µm'nin altındadır. Bu veriler bize artan sıcaklık ile birlikte ortalama tane boyutunun ve standart sapma değerinin dolayısı ile tane boyut aralığının arttığını net bir şekilde göstermektedir.



Şekil 7. Farklı sıcaklıklarda sinterlenmiş S2-A7Y3 numunesine ait SiC tane boyut dağılımları fonksiyonları a) 1700°C, b) 1800°C, c) 1900°C ve d) 2000°C sıcaklıkta (SiC grain size distributions functions of the samples S2-A7Y3 which were sintered at different temperatures a) 1700°C, b) 1800°C, c) 1900°C and d) 2000°C)

3.3. Rietveld analizi sonuçları (Rietveld analysis results)

Numunelerdeki fazlarının miktarsal oranları (kantitatif XRD analizi) Maud programı ile Rietveld metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Uygulanan metot ile, yüksek çözünürlüklü XRD paternlerinin kristal yapı dosyalarını içeren veri tabanları kullanılarak gerekli pik düzeltmeleri (Rietveld Refinement) yapılmakta ve standart sapma oranları ile birlikte fazların % oranları verilmektedir [24]. Sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. h-BN miktarları % 6,12 ile 7,02 arasında değişmektedir. 1700°C’den 1900°C’ye sıcaklık artırıldığında h-BN miktarında %0,9’luk bir artış söz konusudur ve 2000°C’de de değişmemiştir.

Tablo 2. Numunelerin Rietveld analiz sonuçları (Rietveld analysis results of samples)

Num. Kodu	% 6-H SiC	%4-H SiC	Teorik %hBN	Hesaplanan % hBN
S2-A7Y3-	88,04	5,54	20	6,12
S2-A7Y3-	87,80	5,22	20	6,98
S2-A7Y3-	86,47	6,49	20	7,02
S2-A7Y3-	86,76	6,22	20	7,02

3.4. Fiziksel özellikleri (Physical properties)

S2-A7Y3’numunesinin farklı sıcaklıklarda hesaplanan su emme ve bulk yoğunluk değerleri ile vickers sertlik değerleri Tablo 3’de verilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak yoğunluk değerlerinin arttığı ve en yüksek olduğu 3,105 g/cm³ değerinin ise 2000°C’de elde edildiği görülmüştür. Bu sonuç ise artan sıcaklığın sinterleme de tane sınırı difüzyonu için itici güç oluşturmasından dolayı beklenen bir sonuçtur. Aynı zamanda artan sıcaklık ile yoğunlaşmadaki değişim parlak yüzey SEM görüntülerinden (Şekil 3) de net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. Numunelerin sertlik değerleri de sıcaklıkla birlikte artmıştır. S2-A7Y3-1900 numunesinde en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde %0,9’luk hBN miktarındaki değişimin yoğunluk ve sertlik üzerinde belirgin bir etkisi olmadığını göstermektedir.

Tablo 3. Numunelerin fiziksel ve mekanik özellikleri (physical and mechanical properties of the samples)

Numune Kodu	Su emme (%)	Bulk Yoğ. (g/cm ³)	Relative Yoğ.(%)	Sertlik (GPa)
S2-A7Y3-1700	0,317	2,918	92,63	8,66
S2-A7Y3-1800	0,090	3,020	96,17	14,86

S2-A7Y3-1900	0,000	3,072	97,83	16,57
S2-A7Y3-2000	0,015	3,105	98,88	15,61

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada α -SiC, H_3BO_3 ve $CO(NH_2)_2$ kullanarak hBN-SiC kompozitler sentezmiş ve SPS yöntemi ile farklı sıcaklıklarda sinterlenmesi sonucunda sıcaklığın kompozit malzemede SiC tane boyutuna etkisi araştırılmıştır. 1700°C'den 2000°C'ye sinterleme sıcaklığı artırıldığında ortalama tane boyutu 1,09 μ m'den 1,96 μ m'ye artmıştır. Tane boyut dağılımlarının standart sapma değerleri ise 1700°C'de 0,445 iken 2000°C'de 0,812 değerine ulaşmıştır, yani artan sıcaklık ile tane boyut dağılım aralığı genişlemiştir. BN'ün SiC'ün sinterleme sıcaklığına bağlı olarak tane büyümesini azalttığı tespit edilmiştir. Sentezlenen h-BN miktarları % 6,12 ile 7,02 arasında değişmektedir. 1700°C'den 1900°C'ye sinterleme sıcaklığı artırıldığında hBN miktarı %0,9 artmış ve 2000°C'de ise değişmemiştir. Sıcaklığa bağlı olarak yoğunluk değerleri artmış ve en yüksek değerine (3,105 g/cm³) 2000°C'de ulaşılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma 1406F321 nolu Anadolu Üniversitesi BAP projesi ile desteklendiğinden dolayı yazarlar olarak Anadolu Üniversitesi'ne teşekkür ederiz.

REFERANSLAR(REFERENCES)

- [1] Abderrazak, H., Hadj Hmida, E.S.B. "Silicon Carbide: Synthesis and Properties," 16.[yazan] Rosario Gerhardt. Properties and Applications of Silicon Carbide. *Tunisia : InTech*, 2011.
- [2] Rashed, H., "Properties and Characteristics of Silicon Carbide," *s.l. : Poco GraphiteTX 76234*, 2002.
- [3] Sadow, S. E., Agarwal, A., "Advances in Silicon Carbide Processing and Applications," *London : Artech House*, 1-58053-740-5, 2004.
- [4] Zhang, G.J., Ohji, T., "Effect of BN content on elastic modulus and bending strength of SiC-BN in situ composites," *Materials Research Society*, vol.15, 1876-1880, 2000.
- [5] Zhang, G.J., Ohji, T., "In Situ Reaction Synthesis of Silicon Carbide-Boron Nitride Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol 84, 1475-79, 2001.
- [6] Zhang, G.J., Beppu, Y., Ohji, T., Kanzaki, S., "Reaction Mechanism And Microstructure Development of Strain Tolerant in Situ SiC-BN Composites," *Acta mater.*,49, 77-82, 2001.
- [7] Zhang, G.J., Yang, J.F., Deng Z.Y., Ohji T., "Effect of Y₂O₃-Al₂O₃ Additive on the Phase Formation and Densification Process of In Situ SiC-BN Composit," *Journal of the Ceramic Society of Japan.*, vol. 109,45-48. 2001.
- [8] Zhang, G.J., Beppu, Y., Ando, M., "In Situ Reaction Synthesis of Silicon Carbide-Boron Nitride Composite from Silicon Nitride-Boron Oxide-Carbon." *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 85, 2858-2860, 2002.
- [9] Kusunose, T., Sekino, T., Ando, Y., "Synthesis of SiC/BN nanocomposite powders by carbothermal reduction and nitridation of borosilicate glass, and the properties of their sintered composites." *Nanotechnology*, vol 19, 275603 9pp, 2008.
- [10] Kusunose, T., Sekino, T., Niihara, K., "Contact Damage of Silicon Carbide/Boron Nitride Nanocomposites." *J. Am. Ceram. Soc. Japan*, Cilt 90, 3341-3344, 2007.
- [11] Jin, H., Xu, H., Qiao, G., Gao, J., Jin, Z., "Study of machinable silicon carbide-boron nitride ceramic composites." *Materials Science and Engineering A*. 214-217, 2008.
- [12] Jin, H., Gao, N., Qiao, G., Gao, J., "Fabrication and properties of machinable SiC/h-BN Nano-composites." *Journal of Ceramic Processing Research*. Cilt 9, 6,630-633, 2008.
- [13] Wang, X., Qiao, G., Jin, Z., "Fabrication of Machinable Silicon Carbide-Boron Nitride Ceramic Nanocomposites." *J. Am. Ceram. Soc.* vol. 87, 565-570, 2004.
- [14] Guillar, F., Allemand, A., Lulewicz, J.-D., Galy J. "Densification of SiC by SPS-effects of time, temperature and pressure." *Journal of the European Ceramic Society*, 27, 2725-2728, 2007.
- [15] Tanaka, H., Zhou, Y., "Low temperature sintering and elongated grain growth of 6H-SiC powder with AlB₂ and C additives," *J. Mater. Res.*, Vol. 14, No. 2, 518-522,1999.

- [16] Lee, Y.-J., Park, Yi-H. and Hinoki, T., “Influence of Grain Size on Thermal Conductivity of SiC Ceramics,” *Materials Science and Engineering*, 18,1-4, 2011.
- [17] Zhan, G.-D., Xie, R.-J., and M. Mamoru, “Effect of β -to- α Phase Transformation on the Microstructural Development and Mechanical Properties of Fine-Grained Silicon Carbide Ceramics,” *J. Am. Ceram. Soc.*, 84, 945–950, 2001.
- [18] Hagio, T., Nonaka, K., Sato, T., “Microstructural Development with Crystallization of Hexagonal Boron Nitride,” *Journal of Materials Science Letters*, vol.16, 795-798, 1997.
- [19] Kodera, T., Toyofuku, N., Yamasaki, H., Ohyanagi, M., Munir, Z.A., “Consolidation of SiC/BN composite through MA-SPS method.” *J Mater Sci.* Vol 43, 6422-6428, 2008.
- [20] Akyol, S., Toy, C., Gönül, T., Tekin, A., Crystallization Behavior and Characterization of Turbostratic Boron Nitride, *Journal of the European Ceramic Society*, vol 17, 1415-1422, 1997.
- [21] Hubáček, M., Ueki, M., Sato, T., Brozek, V., “High-temperature behaviour of hexagonal boron nitride,” *Thermochimica Acta*, 282/283, 359-367, 1996.
- [22] Zhang, G.J., Ohji, T., “Effect of BN content on elastic modulus and bending strength of SiC–BN in situ composites. ” *Materials Research Society*. 15,1876-1880, 2000.
- [23] Wu, W.W., Estili, M., Nishimura, T., Zhang, G.J., Sakka, Y., “Machinable ZrB₂–SiC–BN composites fabricated by reactive spark plasma sintering.” *Materials Science & Engineering A* 582, 41–46, 2013.
- [24] <http://www.mta.gov.tr/>, (27,01,2017)

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 09.05.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 27.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.311241	

Sönümsüz gürültü transfer fonksiyonlarının hesaplanması

Akın Oktav*¹

ÖZ

Mühendislik yapılarında gürültü iletiminin tanılanması için oluşturulan hesaplamalı modeller deneysel veriler ile denetlenmektedir. Sönümlenme verisi ekseriyetle mevcut olmadığından, gürültünün modellenmesi ve azaltılmasına dönük hesaplamalı çalışmalarda sönümsüz modeller kullanılmaktadır. Yüksek ilgileşim katsayılarına erişilebilmesi için deneysel modellerin de sönümsüz olması gerekir. Bu çalışmada, gürültü transfer fonksiyonlarından sönümlenme bilgisinin ayrıştırılması için analitik bir çözüm önerilmektedir. Önerilen çözüm bir durum çalışması ile örneklendirilmiştir. Bir otomobilin gürültü transfer fonksiyonları deneyle ölçülmüştür. Deneysel çalışmada metot olarak kaynak–iletim yolu–alıcı yaklaşımı tercih edilmiştir. Önerilen analitik çözüm kullanılarak deney verilerindeki sönümlenme bilgisi ayrıştırılmıştır. Hesaplamalı model, sönümsüz transfer fonksiyonları ile güncellenmiştir. Tanılanan sönümlenme bilgisi güncel modele uyarlanarak nihai model elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: sönümlenme, gürültü transfer fonksiyonu, gürültü iletimi

Calculation of undamped noise transfer functions

ABSTRACT

Computational models that are constructed to identify the noise transmission in engineering structures are examined using the experimental data. Since damping data are often unavailable, undamped models are used in computational studies, which are performed to model and to suppress noise. To achieve high correlation coefficients, experimental models should be undamped, as well. The current study offers an analytical solution to separate damping from the noise transfer functions. The proposed solution is exemplified through a case study. Noise transfer functions of an automobile are measured experimentally. For the experimental study, the source–path–receiver approach is employed. The damping information embedded in the experimental data is separated using the proposed analytical solution. The computational model is updated using the undamped transfer functions. Final model is obtained by imposing the identified damping information to the updated model.

Keywords: damping, noise transfer function, noise transmission

* Corresponding Author

¹ Mechanical Engineering Department, Boğaziçi University, 34342, Istanbul, Turkey | akin.oktav@boun.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gürültü, insan sağlığını ve yaşam kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir [1]. Yapılan çalışmalar, çevresel gürültünün insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinin tahmin edilenin üzerinde olduğunu göstermektedir [2]. Çevresel gürültü, tüm gelişmiş ülkelerde mevzuat ile denetlenmekte ve yaptırımlar uygulanmaktadır. Yapılan çalışmaların sonuçları göz önüne alınarak, çevresel gürültü konusundaki mevzuat zaman içerisinde güncellenmekte ve kabul edilebilir gürültü değerleri mütemadiyen aşağı yönlü revize edilmektedir [3]. Türkiye’de “Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği” 2010 tarihinde yürürlüğe girmiştir [4].

Çevresel gürültü, mevzuat ile denetlenirken, otomobil, beyaz eşya, elektrikli aletler gibi sanayi ürünleri, tüketicinin akustik konforu açısından bir denetime tabi değildir [5]. Ancak, gürültü konusundaki hassasiyet ve tüketici farkındalığı gün geçtikçe arttığından, akustik konfor önemli bir rekabet unsuru haline gelmiştir. Özellikle, beyaz eşya ve elektrikli ev aletleri grubu ürün etiketlerinde, artık gürültü niteliklerine de yer verildiği görülmektedir. İmalatçı firmalar ürünlerinin akustik konforunu geliştirebilmek için sürekli çalışmalar yapmaktadır. Ürün tasarımı ve seri üretim aşamalarında analizler ve testler yapılarak akustik konfor açısından tedbirler alınmaktadır.

Bilindiği üzere, yapısal yolla gürültü iletimi titreşimlerden kaynaklanmaktadır. Yapısal yolla gürültü iletimi, bir binanın duvarındaki, bir köprünün tabliyesindeki veya bir aracın tabanındaki titreşimlerle oluşabilir. Verilen örneklerdeki yapısal titreşimlerin hiç birinin sönümlemeden azade olmadığı açıktır.

Yukarıdaki paragrafta verilen örnekler incelendiğinde; bir otomobildeki gürültü motor titreşimlerinden, yol girdilerinin süspansiyon sistemini harekete geçirmesinden ve aerodinamik girdilerin araç yüzeyi ile etkileşimden oluşabilir [6]. Motor farklı devirlerde çalıştığında, motor kulakları üzerinden enerji ileterek kasanın titreşimine neden olmakta ve kasanın titreşimi de araç içerisindeki durağan hava boşluğunda basınç dalgalanmaları oluşturmaktadır [7]. Araç içerisinde algılanan gürültüye bu basınç dalgalanmaları neden olmaktadır. Gürültü

oluşumu beyaz eşyalarda da farklı değildir. Örneğin, çamaşır makinesinin motoru ve dönen tamburu titreşime neden olmakta, panellere aktarılan titreşim, panellerin etrafındaki havayı iterek basınç dalgalanmaları oluşturmaktadır [8].

Analitik modelleme açısından ele alındığında, yapısal titreşimler, kütle, direngenlik ve sönümlenme matrisleriyle ifade edilmektedir [9]. Yapının malzeme özelliklerinin, yoğunluğunun ve kalınlığının bilindiği kabul edilirse, kütle ve direngenlik matrislerinin güvenilir bir şekilde oluşturulabileceği söylenebilir. Ancak, yapıların sönümlenme özellikleri bilinemediğinden, uygun testlere tabi tutularak ölçülmesi veya enerji bağıntıları kullanılarak bilgisayar benzetimi ile kestirimlerde bulunulması gerekmektedir. Enerji bağıntılarının kullanılabilmesi için modal yoğunluğun yüksek olması gerekir. Modal yoğunluk birim frekans aralığındaki ortalama mod sayısıdır. Modal yoğunluk frekansa bağlı olduğundan, düşük frekanslarda enerji bağıntılarını kullanarak netice alma imkânı yoktur. Düşük frekanslardaki sönümlenme davranışını modelleyebilmek için, ilk örnek ürünün testlere tabi tutulması gerekir. Öte yandan, tasarımı geliştirebilmek adına güvenilir sonuçlar elde etmek için bilgisayar benzetimlerine ihtiyaç olduğu açıktır. Bu benzetimlerde, hesaplamalı ve deneysel modellerin ilgileşimi tesis edilmelidir [10].

Hesaplamalı modellerde ekseriyetle, sonlu eleman veya sınır elemanı gibi deterministik eleman esaslı modelleme teknikleri kullanılmaktadır. Mevcut malzeme özellikleri, yoğunluk ve kalınlık verisi kullanılarak güvenilir bir sönümsüz model oluşturulabilir. Test modeli ile ilgileşim noktasındaki sorun, test modelinin sönümlü olmasıdır. Tüm fiziksel sistemlerde doğal olarak sönümlenme özelliği bulunduğundan, test ile ölçülen frekans cevabı veya gürültü transfer fonksiyonları sönümlüdür.

Bu çalışmada, test verisiyle elde edilen gürültü transfer fonksiyonlarındaki sönümlenme bilgisini ayırtmak için analitik bir çözüm önerilmektedir. Mevcut çalışma bu yönüyle orijinal bir katkı sunmaktadır. Önerilen çözüm kullanılarak, sönümsüz hesaplamalı model, sönümsüz test verisi ile tümlenebilir. Alınacak netice, modal güvence matrislerinin ilgileşim katsayıları ile denetlenebilir. Bilahare, test verisi ile tümlenen sönümsüz benzetim modeline, ölçülen sönümlenme verileri dayatılabilir. Dahası, ürünün akustik özelliklerinin geliştirilmesi için farklı sönümlenme

özellikleri kullanılarak farklı benzetimler yapılabilir. Benzetimlerden netice alınması halinde, akustik konforu geliştirmek için tasarımda tadilatlar yapılabilir.

2. ANALİTİK ÇÖZÜM (ANALYTICAL SOLUTION)

Çoklu serbestlik dereceli bir sistem için, zaman alanındaki hareket denklemi

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = f(t) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem 1’de M , C ve K , sırasıyla kütle, viskoz sönümleme ve dirençlilik matrisleri; x ve f deplasman ve kuvvet vektörleridir. Bu denklemin frekans alanındaki ifadesi ise aşağıdaki gibidir.

$$[-\omega^2 M + i\omega C + K]X(\omega) = F(\omega) \quad (2)$$

Burada, $i = \sqrt{-1}$ sanal birimdir. Deneysel modal analizinden bilindiği üzere, deneysel transfer fonksiyonu (H^D) ile deplasman (X) ve kuvvet (F) vektörleri arasında aşağıda verilen bağıntı mevcuttur.

$$X(\omega) = H^D(\omega) F(\omega) \quad (3)$$

Sadelik için, bu noktadan sonra denklemlerin frekans alanında olduğunu belirten (ω) ifadesi yazılmayacaktır. Denklem 2 ve Denklem 3 kullanılarak, aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$[H^D]^{-1} = [-\omega^2 M + i\omega C + K] \quad (4)$$

Deneysel transfer fonksiyonu matrisinin (H^D), reel (R) ve sanal (I) kısımları ise aşağıdaki gibi ifade edilmektedir [11].

$$[H_R^D]^{-1} = K - \omega^2 M = [H^S]^{-1} \quad (5)$$

$$[H_I^D]^{-1} = \omega C \quad (6)$$

Denklem 5’te sağ kısımda tanımlanan H^S matrisi sönümsüz transfer fonksiyonudur. Tüm fiziksel sistemlerde sönümleme olduğu için bu fonksiyon deneyle ölçülemez. Ancak, deneyle ölçülen transfer fonksiyonundan türetilmesi mümkündür. Denklem 2 ve Denklem 5 kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$[[H^S]^{-1} + i\omega C]X = F \quad (7)$$

Denklem 7’nin her iki tarafı H^S matrisiyle önden çarpılırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$iH^S \omega C X + X = H^S F \quad (8)$$

Denklem 3 ve Denklem 8 kullanılarak aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$iH^S \omega H^D F C + H^D F = H^S F \\ \Rightarrow iH^S \omega H^D C + H^D = H^S \quad (9)$$

Denklem 9’da $D = H^S \omega C$ şeklinde bir dönüşüm matrisi tanımlanırsa aşağıdaki eşitlik elde edilir [12].

$$iDH^D + H^D = H^S \quad (10)$$

Deneysel transfer fonksiyonu matrisi (H^D) reel ve sanal kısımlarına ayrılarak, Denklem 10’da yerine konulursa aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$H^D = H_R^D + iH_I^D \Rightarrow iD[H_R^D + iH_I^D] + H_R^D + iH_I^D = H^S \\ \Rightarrow iDH_R^D - DH_I^D + H_R^D + iH_I^D = H^S \quad (11)$$

Denklem 11 tekrar düzenlendiğinde aşağıdaki eşitlik yazılabilir.

$$[H_R^D - DH_I^D] + i[DH_R^D + H_I^D] = H^S \quad (12)$$

Dikkat edilirse, Denklem 12’nin sağ tarafı reel olduğu için, sol tarafındaki ifadede sanal kısmın sıfıra eşit olması gerekmektedir [13].

$$DH_R^D + H_I^D = 0 \quad (13)$$

$$\Rightarrow D = -H_I^D [H_R^D]^{-1} \quad (14)$$

Denklem 14 ile ifade edilen dönüşüm matrisi, Denklem 12’de yerine konulursa, sönümsüz transfer fonksiyonu matrisi ile deneysel transfer fonksiyonu matrisi arasında aşağıda gösterilen bağıntı kurulmuş olur.

$$H^S = H_R^D + H_I^D [H_R^D]^{-1} H_I^D \quad (15)$$

Böylelikle, ölçüm ile elde edilen transfer fonksiyonu matrisi kullanılarak, sönümsüz transfer fonksiyonu matrisi hesaplanabilir. Ayrıca, Denklem 14 kullanılarak sönümleme matrisi de tanımlanabilir. Dönüşüm matrisi tekrar yerine konularak, Denklem 14 aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$H^S \omega C = -H_I^D [H_R^D]^{-1} \\ \Rightarrow C = -\omega [H^S]^{-1} H_I^D [H_R^D]^{-1} \quad (16)$$

Bilindiği üzere, transfer fonksiyonu genel bir tabir olup, gerçekleştirilen uygulamaya göre farklı teknik terimlerle ifade edilmektedir. Bu nedenle, literatürde farklı teknik terimler ve farklı notasyonlara rastlanabilir:

- Dinamik direngenlik (kuvvet/deplasman)
- Empedans (kuvvet/hızlanma)
- Devingenlik (hızlanma/kuvvet)
- Belli kütle (kuvvet/ivmelenme)
- Gürültü (basınç/kuvvet)

Listelenen transfer fonksiyonları ölçüm ve tanılama açısından birbirlerinden farklıdır. Takdim edilen analitik çözümde ise türetme, deplasman/kuvvet ilişkisi ile oluşan ‘dinamik esneklik’ tipi transfer fonksiyonu üzerinden yapılmıştır. Verilen analitik çözüm, anılan tüm transfer fonksiyonlar tipleri için geçerlidir. Bir sonraki bölümde verilen durum çalışmasında, gürültü transfer fonksiyonu uygulaması gösterilmektedir.

3. DURUM ÇALIŞMASI (CASE STUDY)

Bir önceki bölümde teklif edilen analitik çözüm bir durum çalışması ile örneklendirilmiştir. Durum çalışması olarak taşıt akustiği konusunda bir uygulama yapılmıştır. Binek bir otomobil üzerinde deneysel ve hesaplamalı analizler gerçekleştirilmiştir. Öncelikle pist testi ile ölçümler alınmıştır. Daha sonra laboratuvar ortamında deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir (Bkz Şekil 1). Deneysel uygulama için, kaynak–iletim yolu–alıcı tekniği [7,14] kullanılmıştır. Kaynak–iletim yolu–alıcı tekniği kullanılırken, kaynak olarak motor ve egzoz seçilmiştir (Bkz Şekil 2). Kaynak ifadesinden kasıt titreşime neden olan bileşendir. Otomobillerde titreşim, motor, yol girdisi veya aerodinamik girdiler ile oluşur. Mevcut durum çalışmasında sadece düşük frekans aralığı (<200 Hz) için ölçüm yapılmıştır. Bu aralıkta, yegâne titreşim kaynağı motor ve egzozdur. İletim yolu, titreşim enerjisini yapıya ileten bileşenlerle ilgilidir. Motor ve egzozdan gelen titreşim, yapıya (aracın kasasına) motor kulakları ve egzoz takozları üzerinden iletilmektedir. Alıcı ise mikrofondur. Mikrofon ile sürücünün algıladığı ses basınç seviyesi ölçülmektedir. Anılan teknik kullanılarak, sürücü tarafından algılanan ses basınç seviyesinin hesaplanması mümkündür. Hesaplama için izlenen metot aşağıda izah edilmektedir.

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} p_1/F_1 & \dots & p_1/F_m \\ p_n/F_1 & \dots & p_n/F_m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_m \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} p_1/Q_1 & \dots & p_1/Q_m \\ p_n/Q_1 & \dots & p_n/Q_m \end{bmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_m \end{pmatrix} \quad (17)$$

Denklem 17’de eşitliğin sağ tarafındaki ilk kısım yapısal yolla, ikinci kısım ise hava yoluyla taşınan sesin hesaplanmasına yöneliktir. Bu denklemde, p ses basıncını, f yapısal yükü, q ise akustik yükü temsil etmektedir. Matrislerdeki p_n/F_m ve p_n/Q_m ifadeleri gürültü transfer fonksiyonlarıdır. Mevcut uygulamada, sadece yapısal yolla taşınan sesin niceliğine dair hesaplama yapılmıştır. Yapısal yolla taşınan sesin hesap edilmesi için p_n/F_m tipi gürültü transfer fonksiyonlarının ölçülmesi gerekmektedir.

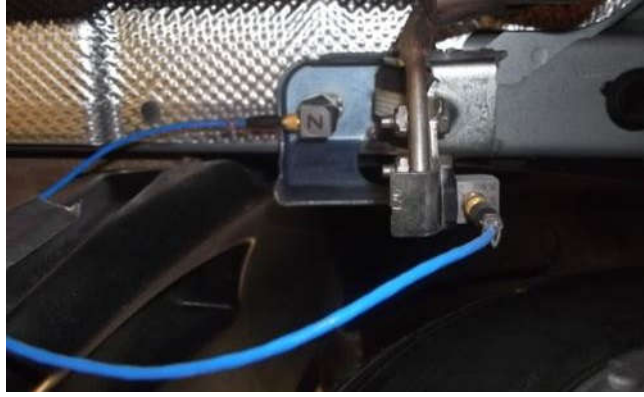
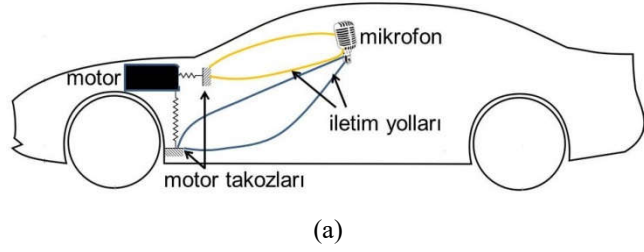


Şekil 1. Test aracı (Test vehicle)

Ölçüm için aracın motoru ve egzozu demonte edilmiştir. Operasyonel şartlarda, motor ve egzozdan gelen titreşimler bağlantılar üzerinden kasaya aktarılmaktadır. Çalışılan araçtaki bağlantılar 3 adet motor kulağı ve 2 adet egzoz takozundan ibarettir. Sadece öteleme yönleri (x, y, z) dikkate alınarak, ses basınç ölçümü için 15 adet iletim yolu tanımlanmıştır. Alıcı olarak sürücü sol kulak (p_s) seviyesi seçilmiştir.

Denklem 17’de ifade edilen, p_n/F_m tipi gürültü transfer fonksiyonlarının ölçülmesi için deney tasarlanmıştır. Deneyde, mobil analiz cihazı, üç eksenli ivmeölçerler, 12 mm’lik piezoelektrik mikrofon ve kuvvet çevirgeçli darbe çekici kullanılmıştır. İvmeölçerler, motor ve egzoz takozlarının kasaya bağlandığı noktalara konumlandırılmıştır. İvmeölçerleri monte etmek için sıcaklığa dayanıklı özel bir yapıstırıcı kullanılmıştır. Darbe çekici ile vuruş yapılan noktalar takoz civatalarının kafa kısmıdır. Darbe

çekicinin kuvvet çevirgecinde çalışılan frekans aralığına uygun olarak yumuşak uç kullanılmıştır.



Şekil 2. Kaynak-iletim yolu-alıcı testi: (a) testin görsel örneklemesi (b) egzoz bağlantısı (c) mikrofonun konumu (Source-path-receiver test (a) demonstration of the test (b) exhaust mount (c) location of the microphone)

Yapısal yüklerin belirlenmesi için operasyonel ivmelenme (\ddot{x}) verisi kullanılmıştır. Bu durumda, tanımlı alıcı noktasında ses basıncı aşağıda verilen denklem uyarınca hesaplanabilir.

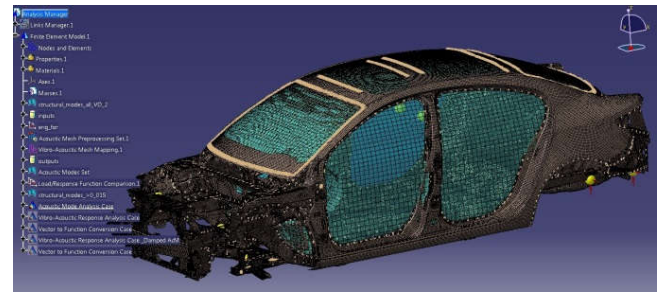
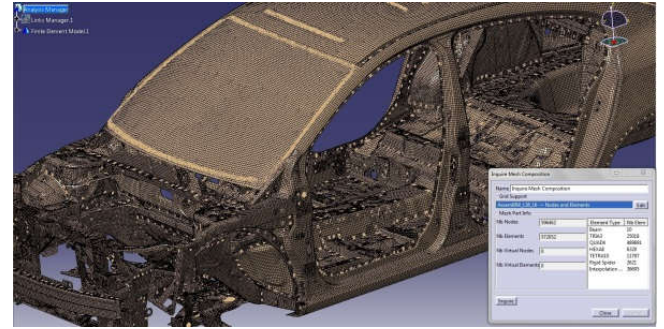
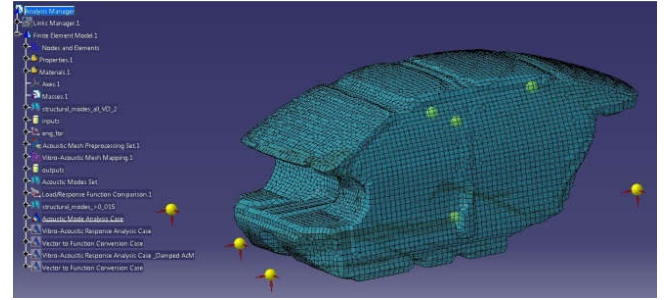
$$\{p_s\} = \begin{bmatrix} p_s/F_1 & \dots & p_s/F_{15} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{15} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Denklem 18'deki kuvvet vektörü (f) ise Denklem 19 ile hesaplanarak yerine konulur.

Bu denklemdeki hesabın yapılabilmesi için, deplasman/kuvvet ilişkisi ile oluşan 'dinamik esneklik' tipi transfer fonksiyonlarının (\ddot{X}_n/F_m) ölçülmesi gerekmektedir. Dinamik esneklik tipi

transfer fonksiyonlarının ölçümleri için yine 3-eksenli ivmeölçerler ve kuvvet çevirgeçli darbe çekici kullanılmıştır. Ölçüm sırasında aracın motoru ve egzozu demonte haldedir.

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_{15} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \ddot{X}_1/F_1 & \dots & \ddot{X}_1/F_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{X}_{15}/F_1 & \dots & \ddot{X}_{15}/F_{15} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \vdots \\ \dot{x}_{15} \end{Bmatrix} \quad (19)$$



Şekil 3. Bağlaışık titreşim-akustik analizi (a) akustik model (b) yapısal model (c) bağlaışık (Coupled vibro-acoustic analysis (a) acoustic model (b) structural model (c) coupled model)

Operasyonel ivmelenme vektörünü (\ddot{x}) ölçmek için ise araç pist testine tabi tutulmuştur [15]. Motor ve egzoz takozlarının aktif (motor) ve pasif (kasa) taraflarından ivme ölçümü alınmıştır. Ortamın sıcaklığı ve bağıl nem değeri kayıt altına alınmıştır. Kullanılan test aracı manuel viteslidir. Pist testi için üçüncü viteste ani hızlanma yapılmış ve tüm motor devirleri taranmıştır.

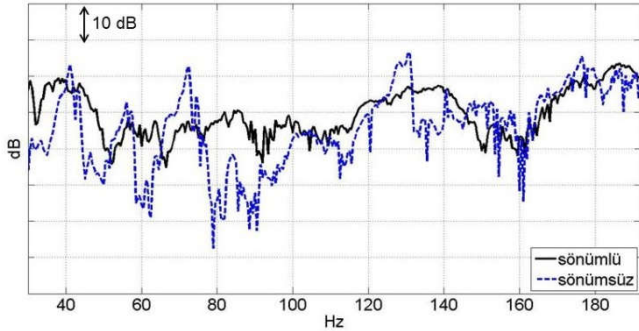
Hesaplamalı analiz için aracın sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Bağlaışık titreşim-akustik

analizi gerçekleştirmek için aracın yolcu kabinindeki hava boşluğu da sonlu elemanlar metodu ile modellenmiştir [16]. Oluşturulan modelin toplam serbestlik derecesi 4 milyon üzerindedir. Hesaplamalı modelde zorlanmış titreşim analizi yapılmıştır. Zorlanmış titreşim için kullanılan girdi, Denklem 19 ile hesaplanan kuvvet vektörüdür.

$$\begin{bmatrix} \ddot{X}_1/F_1 & \dots & \ddot{X}_1/F_{15} \\ \ddot{X}_1/F_1 & \dots & \ddot{X}_1/F_{15} \\ \ddot{X}_1/F_1 & \dots & \ddot{X}_1/F_{15} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \ddot{X}_{15}/F_1 & \dots & \ddot{X}_{15}/F_{15} \end{bmatrix} / \begin{bmatrix} F_{15} \\ \vdots \\ F_{15} \end{bmatrix}$$

↑ frekans

Şekil 4. Üç boyutlu transfer fonksiyonu matrisleri (Transfer function matrix in three dimensions)

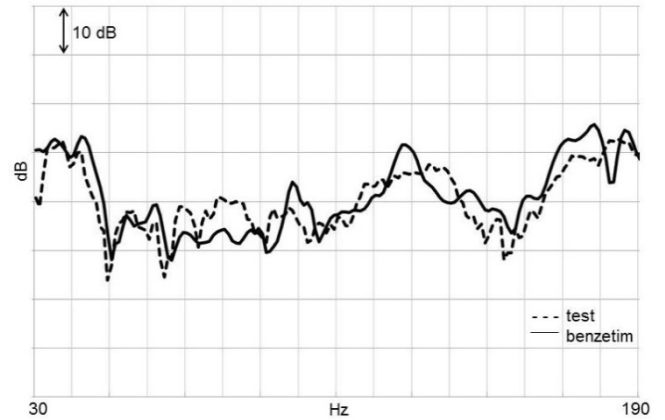


Şekil 5. Hesaplanan ses basınç seviyelerinin kıyaslanması (Comparison of the calculated sound pressure levels)

Sönümlenme değerleri bilinmediğinden, Şekil 3'te gösterilen modellemeler sönümsüzdür. Dolayısıyla, bağlaşıklık titreşim-akustik analizi sonucu elde edilen transfer fonksiyonları da sönümsüz olacaktır. Test ile bulunan ses basınç seviyesi sonuçları ise sönümlü transfer fonksiyonları üzerinden hesaplanmıştır. Makul bir kıyaslama yapılabilmesi için, test verilerinin işlenerek sönümsüz hale getirilmeleri gerekir. İkinci bölümde verilen analitik çözüm, Matlab™ yazılımı üzerinden uygulanmıştır. Uygulamada dikkat edilmesi gereken husus, matrislerin 3 boyutlu olmasıdır (bkz. Şekil 4). Frekans alanında ayrık veri ile çalışıldığından, transfer fonksiyonu matrisindeki girdiler her frekans (ω) çözünürlüğü için farklı değer alacaktır.

Denklem 18 kullanılarak hesaplanan ses basınç seviyeleri Şekil 5'te verilmektedir. Sönümlü ve sönümsüz gürültü transfer fonksiyonları kullanıldığında, sonuçların önemli oranda fark ettiği görülmektedir. Bu farklılık nedeniyle, hesaplamalı modelin deneysel veri ile

güncellenmesi sırasında sönümsüz transfer fonksiyonlarının kullanılması yerinde olacaktır. Böylece, hesaplamalı model güncellenirken yüksek ilgileşim katsayıları elde edilebilir. Model güncellendikten sonra, Denklem 16 kullanılarak elde edilen sönümlenme değerleri nihai modele uyarlanabilir. Elde edilecek nihai hesaplamalı model tasarım üzerinde tadilat yapmaya elverişli hale gelecektir. Böylece, fiziksel model üzerinde deneme-yanılma yoluyla tadilat uygulamak yerine, güncel hesaplamalı model üzerinde güvenilir en iyileştirme çalışmaları yapmak mümkün olacaktır.



Şekil 6. Test ve benzetim sonuçlarının kıyaslanması: sönümlü modeller (Comparison of the test and simulation results: damped models)

Tasarımda tadilat konusu mevcut çalışmanın kapsamı dışındadır. Ancak, elde edilen nihai hesaplamalı model tasarım üzerinde tadilat yapmaya elverişlidir. Şekil 6'da, test ve benzetim ile elde edilen ses basınç seviyeleri kıyaslanmaktadır. İki eğri arasındaki farkın L_2 normu 4,19 dB'dir. Sonuçların kabul edilebilir oranda örtüştüğü görülmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, fiziksel test ile elde edilen transfer fonksiyonlarındaki sönümlenme bilgisini ayırtmaya dönük analitik bir çözüm önerilmiştir. Önerilen analitik çözüm, bir durum çalışması ile gürültü transfer fonksiyonlarına uygulanmıştır. Elde edilen sönümsüz gürültü transfer fonksiyonları ve tanımlanan sönümlenme matrisi, hesaplamalı çalışmalarda kullanılmıştır. Hesaplamalı çalışmalar; kaynak-iletim yolu-alıcı tekniği ve bağlaşıklık titreşim-akustik analizidir.

- Kaynak-iletim yolu-alıcı tekniği kullanılarak hedef mikrofon noktasında oluşan ses basınç seviyesi hesaplanmıştır. Sönümlü ve sönümsüz gürültü transfer fonksiyonları


kullanılarak farklı hesaplamalar yapılmış ve sonuçlar kıyaslanmıştır (Şekil 5).

- Bağlaşık titreşim–akustik analizi için sönümsüz sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan hesaplamalı model, önce sönümsüz test verisi ile güncellenmiş ve ilişileşim analizi yapılmıştır. Daha sonra, tanılanan sönümleme değerleri kullanılarak, nihai sönümlü model elde edilmiştir.
- Kaynak–iletim yolu–alıcı hesaplaması ile elde edilen test sonuçları, bağlaşık titreşim–akustik analizi ile elde edilen benzetim sonuçları ile kıyaslanmıştır. Elde edilen iki ses basınç seviyesi eğrisinin makul bir şekilde örtüştüğü gözlemlenmiştir (Şekil 6).

Önerilen analitik çözüm başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Elde edilen nihai hesaplamalı model, testle ölçülen transfer fonksiyonları üzerinden hesap edilen güncel sönümleme bilgisini de içermektedir. Doğrulanmış bir modelin oluşturulması, tasarım üzerinde tadilat ve en iyileştirme çalışmalarının güvenilirliği açısından önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Basner, W. Babisch, A. Davis, M. Brink, C. Clark, S. Janssen, and S. Stansfeld, “Auditory and non-auditory effects of noise on health,” *The Lancet*, vol. 383, no. 9925, pp. 1325-1332, 2014.
- [2] A. Seidler, J. Hegewald, A.L. Seidler, M. Schubert, M. Wagner, P. Dröge, E. Haufe, J. Schmitt, E. Swart, and H. Zeeb, “Association between aircraft, road and railway traffic noise and depression in a large case-control study based on secondary data,” *Environmental Research*, vol. 152, pp. 263-271, 2017.
- [3] H. Dal, “Sakarya D100 (E5) karayolu trafik gürültüsünün değerlendirilmesi,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 20, no. 2, pp. 147-154, 2016.
- [4] RESMİ GAZETE, Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği, Sayı: 27601, Haziran 4, Haziran 2010.
- [5] Network FUIORE, “R & D technology road map,” 2003.
- [6] Y. Özkan, İ. Özsert, A. Vezir, and İ. Cesur, “Reaktif tip susturucunun iç tasarımının akış ve akustik özelliklerine etkisinin incelenmesi,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 20, no. 1, pp. 65-74, 2016.
- [7] A. Oktav, G. Anlaş, and Ç. Yılmaz, “Assessment of vehicle noise variability through structural transfer path analysis,” *International Journal of Vehicle Design*, vol. 71, no. 1, pp. 300-320, 2016.
- [8] S. Wang, C. Nerse, and K.H. Woo, “Vibro-Acoustic Noise Analysis of a Washing Machine,” *Sensors and Instrumentation*, vol. 5, pp. 47-53, 2017.
- [9] P. Davidsson, *Structure-Acoustic Analysis: Finite Element Modeling and Reduction*, Doktora tezi, Lund University, 2004.
- [10] E.O. Boru and M. Kutanis, “Çevrel titreşim kayıtları kullanılarak yapı dinamik parametrelerinin belirlenmesi,” *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 19, no. 1, pp. 59-66, 2015.
- [11] J-H. Lee and J. Kim, “Development and validation of a new experimental method to identify damping matrices of a dynamic system,” *Journal of Sound and Vibration*, vol. 246, no. 3, pp. 505-524, 2001.
- [12] S.Y. Chen, M.S. Ju, and Y.G. Tsuei, “Estimation of mass, stiffness and damping matrices from frequency response functions,” *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 118, no. 1, pp. 78-82, 1996.
- [13] A. Oktav, Ç. Yılmaz, and G. Anlaş, “Transfer path analysis: Current practice, trade-offs and consideration of damping,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 85, pp. 760-772, 2017.
- [14] J.W. Verheij, “Experimental Procedures for Quantifying Sound Paths to the Interior of Road Vehicles,” in *2nd International Conference on Vehicle Comfort*, Bologna, 1992.
- [15] ISO 5128, *Acoustics Measurement of Noise Inside Motor Vehicles*, 1980.
- [16] H. Şerafettinoğlu, *Akustik yapısal bağlaşık sistemlerde gürültü patikalarının tanılanması*, Doktora tezi, ODTÜ, 2004.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Gelis/Received</u> 13.06.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 31.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.321228	

Dietil Eter-Dizel Karışımlarının Direkt Enjeksiyonlu Bir Dizel Motorunun Performans ve Emisyonlarına Etkisi

Vezir Ayhan^{*1}, Serdar Tunca²

ÖZ

Dietil eter (DEE) dizel motorlarında kullanılabilecek yenilenebilir, yüksek setan sayılı, makul seviyede enerji yoğunluğu, yüksek oksijen içeriği, düşük ateşleme sıcaklığı ve yüksek uçuculuğa sahip alternatif yakıtlardan biridir. Bu çalışmada tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, su soğutmalı bir dizel motorunda DEE-Dizel karışımlarının motor performans ve emisyon karakteristiklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. DEE-dizel karımları, DEE3 (%3 DEE+%97 Dizel), DEE5 (%5 DEE) ve DEE7 (%7 DEE) şeklinde farklı kütle oranlarında hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar dizel yakıtı ve karışımlar motorda kullanılarak tam yük şartlarında 1000, 1300, 1600, 1900 ve 2000 d/d motor hızlarında gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda, motorda yakıt olarak DEE karışımları kullanıldığında standart motor verilerine göre motor döndürme momenti ve efektif gücünde azalma, özgül yakıt sarfıyatı ve efektif verimde iyileşmelerin olduğu tespit edilmiştir. Dizel motorları için büyük problem olan NO_x ve İs emisyonlarında ise kayda değer oranda azalmaların meydana geldiği saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: dizel motor, DEE karışımları, motor performansı, emisyon

The Effect of Diethyl Ether-Diesel Blends a Direct Injection Diesel Engine on Performance and Emissions

ABSTRACT

Diethyl ether (DEE) is one of the alternative fuels that can be used in diesel engines with renewable, high cetane number, energy density at reasonable level, high oxygen content, low ignition temperature and high volatility. In this study, the effects of DEE-Diesel mixtures on engine performance and emissions characteristics in a single-cylinder, direct-injection, water-cooled diesel engine was investigated experimentally. DEE-diesel mixtures were prepared at different mass ratios as DEE3 (3% DEE + 97% Diesel), DEE5 (5% DEE) and DEE7 (7% DEE). Experimental studies were carried out under full load conditions using diesel fuel and DEE-diesel mixtures at 1000, 1300, 1600, 1900 and 2000 rpm engine speeds. As a result of the studies, it has been found that, when DEE blends are used as fuel, in engine torque and effective power decrease, the specific fuel consumption and the effective efficiency improvement compared to standard engine datas. It has been found that NO_x and smoke emissions, which are major problems for diesel engines, decrease considerably.

Keywords: diesel engine, DEE blends, engine performance, emissions

*1 Vezir Ayhan Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya/Türkiye, vayhan@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ

Benzin motorlarına kıyasla özgül yakıt tüketiminin düşük olması ve yüksek sıkıştırma oranı sebebiyle bütün yüklerde daha verimli çalışması, özellikle orta ve ağır hizmet tipi araçlar için dizel motorlarını cazip kılmakta ve her geçen gün birçok alanda farklı amaçlarla kullanımı artmaktadır [1]. Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre 2004 yılında ülkemizde kullanılmakta olan motorlu kara taşıtlarının %32.7'si dizel motorlu iken, 2016 yılında bu oranın %33.6'ya yükseldiği anlaşılmaktadır [2]. Ancak dizel motorlarının, buji ateşlemeli motorlara göre sıkıştırma oranının yüksek olması ve daha yüksek hava fazlalık katsayısı ile çalışması nedenleri ile NO_x ve İ_s emisyonlarının çok daha yüksek seviyede salınımı büyük problemlerden biridir. Emisyon değerlerine getirilen yasal düzenlemeler araştırmacıları ve üreticileri bu konuda önlem almaya yönlendirmektedir. Motorlardan salınan emisyonların azaltılmasında alınan tedbirler yanma öncesi, yanma esnasında ve yanma sonrası alınan tedbirler olarak sınıflandırmak mümkündür. Yanma öncesi alınana tedbirlerden biri yakıt kalitesinin iyileştirilmesi, yakıtta katkı maddelerinin katılması, alternatif yakıtların kullanılması vb. şeklinde özetlenebilir [1]. Dizel motorlarda kullanılan başlıca yenilenebilir alternatif yakıtlardan biride dietil eterdir.

Dietil eter, dizel motorlarından salınan zararlı NO_x ve İ_s emisyonlarında önemli düzeyde azalma sağlaması nedeni ile dizel yakıtına karıştırılarak motorlarda kullanılan yenilenebilir bir alternatif yakıttır. DEE, etanolden elde edildiği için biyoyakıt olarak da isimlendirilmektedir. Normal atmosfer şartlarında sıvı fazda olması dizel yakıtına karışım imkanını kolaylaştırmakta ve istenilen oranda karışım hazırlanabilmektedir [3]. DEE sahip olmuş olduğu yakıt özellikleri nedeni ile son yıllarda özellikle dizel yakıtına belirli oranlarda karıştırılarak veya fumigasyon yöntemiyle yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır[4].

Cheng and Dibble [5], 6 silindirli, direkt enjeksiyonlu, aşırı doldurmalı bir dizel motorunda dizel ve %5, %10, %20 ve %30 hacimsel oranlarda DEE-Dizel karışımlarını yakıt olarak kullanmışlardır. 6 farklı motor devrinde ve yükünde gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar

sonucunda DEE karışımları kullanıldığında dizel yakıtta göre partikül madde (PM) emisyonlarında dikkate değer oranda, NO_x emisyonlarında ise bir miktar azalmanın olduğunu tespit etmişlerdir.

Sezer [3], tek silindirli, direkt enjeksiyonlu ve sıkıştırma oranı 20/1 olan bir dizel motorunda DEE-dizel (%2,5, %5, %7,5 ve %10 hacimsel) karışımlarının motor performansına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Çalışması sonucunda dizel yakıtına DEE katılmasının motor momenti ve gücünde azalmaya neden olduğunu belirtmiştir. Diğer taraftan %2,5, %5 ve %7,5 DEE karışım oranlarında dizel yakıtta göre özgül yakıt sarfiyatında azalmaların, efektif verimde ise artmaların olduğunu tespit etmiştir. DEE karışımlarıyla ayrıca hava fazlalık katsayısında artmaların ve egzoz sıcaklığında ise bir miktar azalmaların meydana geldiğini ileri sürmüştür.

Lee ve Kim [6], bir dizel motorunda kütleli oranda hazırladıkları %10, %20 ve %50 DEE-Dizel karışımlarının motor performans, yanma karakteristiği ve egzoz emisyonlarına etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmaları sonucunda PM, HC ve CO emisyonlarında azalmaların meydana geldiğini, NO_x emisyonlarında artmaların meydana geldiğini ileri sürmüşlerdir.

Rakopoulos ve ark. [7], hacimsel oranda %8, %16, ve %24 DEE-Dizel karışımlarını tek silindirli, 4 zamanlı, yüksek hızlı bir dizel motorunda yakıt olarak kullanmışlar ve motor performans ve emisyon karakteristiklerindeki değişimleri standart motor verileriyle karşılaştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, NO_x, İ_s, CO emisyonlarında azalmaların meydana geldiğini HC emisyonları ve özgül yakıt sarfiyatında ve egzoz sıcaklığında artmaların olduğunu tespit etmişlerdir.

Subramanian and Ramesh [8], tek silindirli, hava soğutmalı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda kütleli oranda (%5, %10 ve %15) DEE-Dizel karışımlarını yakıt olarak kullanmışlar ve motor performans ve emisyon karakteristiklerine etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Termal verim açısından dizel yakıtta göre %10 karışımın en iyi sonuç verdiğini tespit etmişlerdir. Bu karışım oranında ve dizel yakıtının kullanıldığı püskürtme avansı değerinde İ_s ve CO emisyonlarında tüm motor yüklerinde dikkate

değer oranda azalmaların meydana geldiğini, yüksek yük şartlarında termik verimde artmaların meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Mohan et al. [9] tek silindirli ve direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda hacimsel olarak hazırladıkları %5, %10, %15,%20 ve %25 oranlarında DEE-Dizel karışımlarını yakıt olarak kullanmışlar, motor performans ve emisyonlara etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmaların sonucunda, performans ve emisyon değerleri açısından dizel yakıtı göre en iyi karışım oranının %5 DEE-Dizel karışımı ile elde etmişlerdir. Bu karışım oranında dizel yakıtı göre is ve CO emisyonlarında azalma, termik verimde ise artmaların olduğunu tespit etmişlerdir.

Bu çalışmada tek silindirli, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda %3 (DEE3), %5 (DEE5) ve %7 (DEE7), DEE-Dizel karışımlarının motorda yakıt olarak kullanarak motor performansına ve emisyonlarına etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Tam yük şartlarında ve 5 farklı motor devrinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen motor performans ve emisyon değerlerinde meydana gelen değişimler standart motor verileriyle karşılaştırılmıştır.

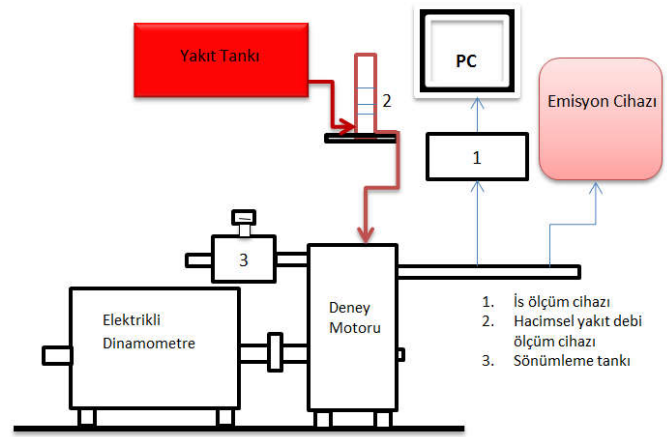
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneylerde tek silindirli, 4 zamanlı, direkt enjeksiyonlu ve su soğutmalı bir dizel motoru kullanılmıştır. Tablo 1’ de deney motorunun teknik özellikleri, Şekil 2’ de ise deney düzeneğinin şematik şekli verilmiştir. Deney motoru elektrikli tip bir dinamometreye bağlanmıştır. Motor gücünün ölçülmesi için dinamometre kuvvet koluna 0,1 kg hassasiyetli S tipi bir yük hücresi bağlanmıştır. Motor yakıt tüketiminin tespitinde 25 ve 50 cm³ ölçüm haznelere sahip hacimsel bir ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Deneysel çalışmalar esnasında motor soğutma suyu giriş-çıkış sıcaklıkları, egzoz sıcaklığı ve ortam sıcaklığı için termoelemanlar ve 0,1 C hassasiyetinde göstergeler kullanılmıştır. İş emisyonlarının ölçülmesinde BİLSA marka İş ölçüm cihazı, NO_x, CO, HC, O₂, CO₂ ve HFK (hava fazlalık katsayısı)’nın ölçülmesinde BOSCH marka BEA model gaz analiz cihazı kullanılmıştır.

Tablo 1. Deney motoru teknik özellikleri

Motor Tipi	Süper Star
Piston Çapı [mm]	108
Strok [mm]	110
Silindir Sayısı	1
Strok Hacmi [dm ³]	1
Güç, 2200 d/d, [kW]	13
Enjektör Açma Basıncı [bar]	175
Püskürtme Avansı [Krank Açısı]	34
Sıkıştırma Oranı	17,5
Maksimum Devir [d/d]	2500
Soğutma Tipi	Su
Püskürtme Tipi	Direkt Enjeksiyon
Piston Tipi	Çanak Piston



Şekil 1. Deney düzeneği

Deneyler tam yük şartlarında 1000, 1300, 1600, 1900, 2200 d/d motor hızlarında gerçekleştirilmiştir. Dizel yakıtı ile tam yük şartlarında püskürtme avansının üst ölü noktadan 34 KMA önce olduğu deneysel olarak tespit edilmiş ve deneysel çalışmalar bu avans değerinde gerçekleştirilmiştir. Deneylere motor soğutma suyu sıcaklığı 70 °C geldiğinde başlanmıştır. Dizel yakıtı ve farklı oranlarda DEE karışımları için deneyler 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiş ve ortalama değerler kullanılmıştır.

Çalışmada, saf dizel yakıtı ve %3, %5 ve %7 kütleli oranlarda DEE-Dizel karışımları kullanılmıştır. DEE-Dizel karışımların hazırlanması 0,01gr hassasiyetinde hassas terazi kullanılmıştır. Tablo 2.de kullanılan yakıtların özellikleri verilmiştir.

Deneysel çalışmalar motor standart değerlerinin elde edilmesi için ilk olarak dizel yakıtı ile gerçekleştirilmiştir. Daha sonra farklı DEE-Dizel karışımları motorda yakıt olarak kullanılarak deneyler tekrarlanmıştır. Çalışmalar sonucunda

elde edilen veriler standart motor verileriyle karşılaştırılarak motor performans ve emisyon karakteristiklerindeki değişimler tespit edilmiştir.

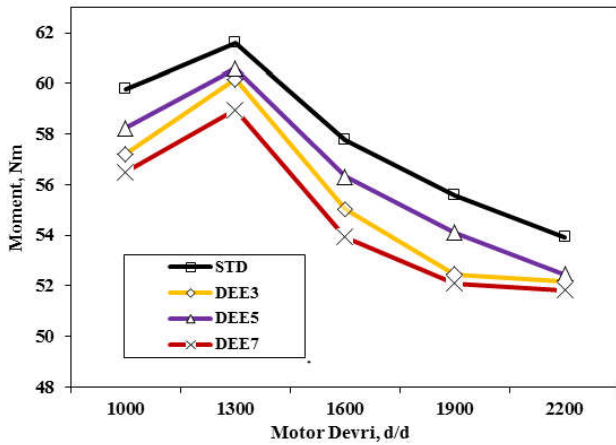
Tablo 2. Yakıtların özellikleri

Özellik	Dizel	Dietil Eter
Kimyasal formül	C _x H _y	C ₄ H ₁₀ O
Alt ısı değer (MJ/kg)	43	33,9
Yoğunluk (kg/dm ³)	0,82	0,71
Setan sayısı	45-55	>125
Kinematic viscosity, mm ² /s	2,6 (40 °C)	0,23 (at 20 °C)
Stokiometrik hava-yakıt oranı	14,6	11,1
Oksijen içeriği (%)	0	21
Buharlaştırma gizli ısı (kJ/kg)	250	356
Moleküler Ağırlık	170	74

3. SONUÇ VE TARTIŞMA

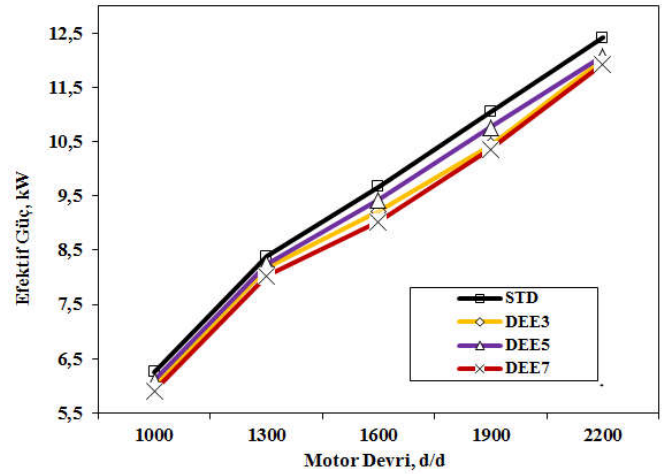
3.1. Motor Performans Parametreleri

Motorda farklı oranlarda DEE- Dizel karışımları kullanılarak elde edilen motor döndürme momenti ve efektif gücünde standart motor verilerine göre meydana gelen değişimler sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3' de verilmiştir.



Şekil 2. Motor moment değişimleri (Engine torque changes)

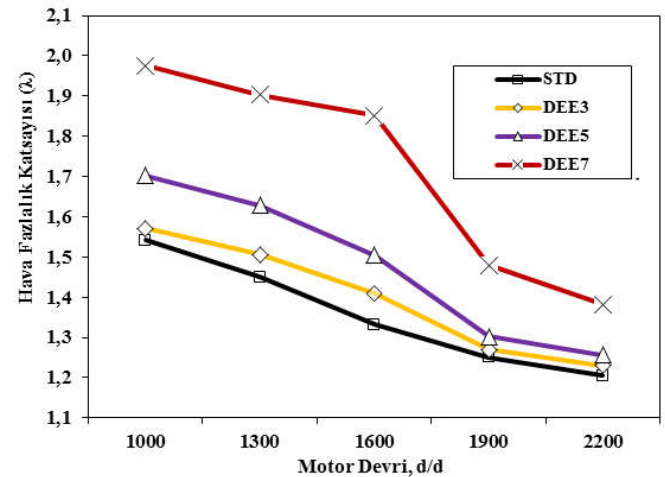
Şekillerden de görüldüğü gibi motorda DEE-Dizel karışımları kullanıldığında tüm karışım oranlarında motor momenti ve efektif gücünde standart motor verilerine göre azalmaların olduğu görülmektedir. DEE5 kullanımında DEE3 ve DEE7 kullanımına göre azalma miktarı daha az olmuştur. Standart durumda tam yük şartlarında maksimum momentin elde edildiği 1300 d/d motor hızında 61,6 Nm ölçülen moment değeri DEE5 kullanımında aynı motor devrinde 60,6 Nm olarak ölçülmüştür. Momentte bu şartlarda meydana gelen değişim %1,65 olmuştur.



Şekil 3. Motor efektif güç değişimleri (Engine effective power changes)

Maksimum gücün elde edildiği 2200 d/d motor hızında standart durumda efektif güç 12,4 kW ölçülürken DEE5 karışımı ile 12,1 kW olarak ölçülmüştür. Bu şartlarda standart duruma göre meydana gelen değişim %2,7 olarak hesaplanmıştır. Moment ve güçte meydana gelen azalma değerinin DEE' in ısı değerinin dizele göre daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca DEE7 kullanımında motorda vuruntu oluştuğu gözlemlenmiştir.

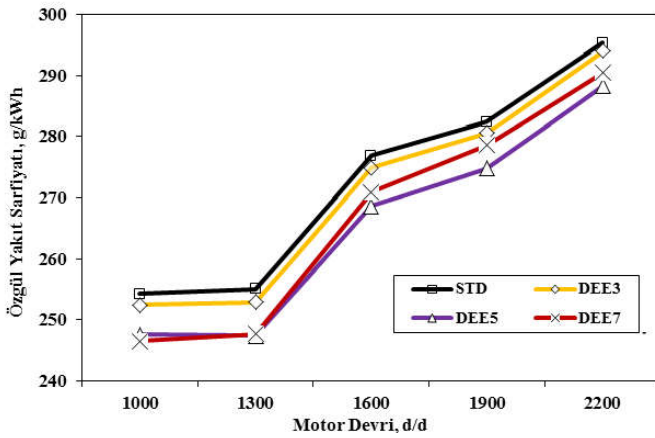
Şekil 4' de dizel ve farklı oranlarda DEE-Dizel karışımlarının kullanıldığı durumlarda ölçülen Hava fazlalık katsayısı (HFK) değişimleri görülmektedir.



Şekil 4. Hava fazlalık katsayısının değişimleri (Air excess coefficient changes)

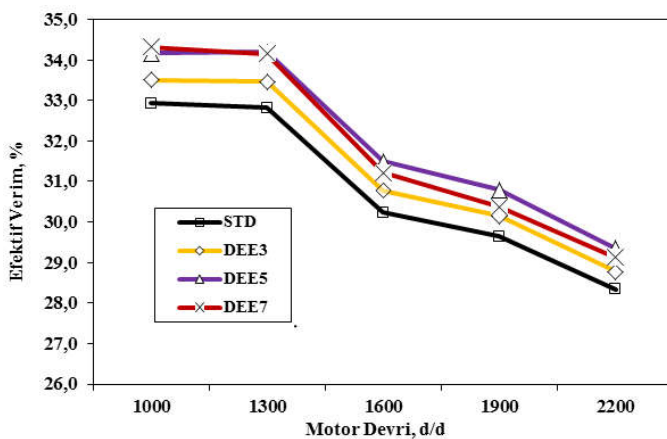
Motorda dizel ve DEE karışımlarının kullanılması durumunda tam yük şartlarında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen motor özgül yakıt sarfiyatı (ÖYS) değişimleri Şekil 5' de görülmektedir. Özgül yakıt sarfiyatı hesaplamaları

kullanılan yakıt oranları ve ısı değerler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Şekil 5 incelendiğinde motorda DEE karışımları kullanıldığında ÖYS' de standart motor verilerine göre azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Motor gücünde azalma olmasına karşılık ÖYS' da meydana gelen azalma miktarı yakıtın ısı değerinin düşük olmasına karşın oksijen içeriğinin yüksek olması motorun daha fakir karışımlarla çalışmasına neden olmaktadır. ÖYS hesaplamasında DEE' in yoğunluğunun düşük olması toplam kütleli yakıt tüketiminin azalmasına neden olmaktadır. ÖYS' daki maksimum azalma miktarı DEE5 ile elde edilmiştir. Bu oranda maksimum azalma miktarı 1600 d/d motor hızında %3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5. Motor ÖYS değişimleri (Engine SFC changes)

Şekil 6' da tam yük şartlarında ve farklı motor devirlerinde dizel yakıtı ve 3 farklı DEE karışımları kullanılan motor efektif değişim değerleri görülmektedir.

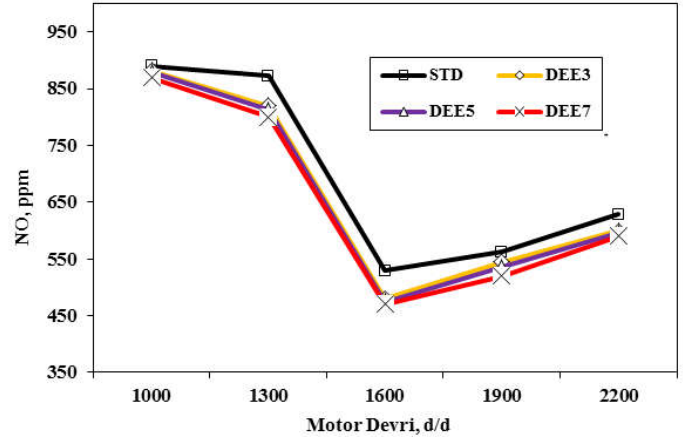


Şekil 6. Motor efektif verim değişimleri (Engine effective efficiency changes)

Şekilden de görüldüğü gibi motorda yakıt olarak DEE karışımları kullanıldığında tüm motor devirlerinde efektif verimde artmaların meydana geldiği görülmektedir. ÖYS' nin azalmasına neden olan etkenler efektif verimin artmasına neden olmuştur.

3.2. Emisyon Karakteristikleri

Motorda dizel ve farklı oranlarda DEE- Dizel karışımları kullanılarak elde edilen NO emisyonlarındaki değişimler Şekil 7' de verilmiştir.

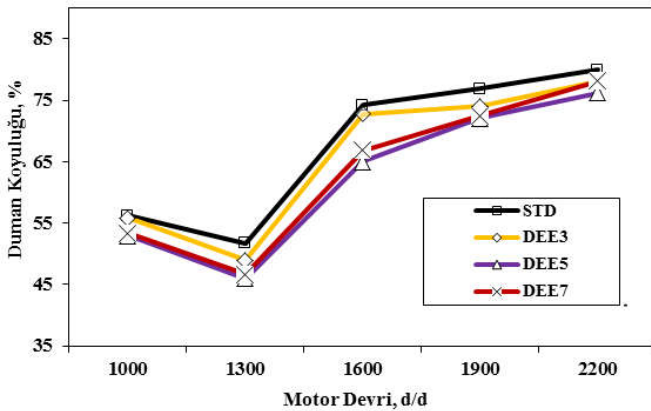


Şekil 7. NOx emisyonları değişimleri (NOx emissions changes)

Şekil incelendiğinde DEE karışımları kullanımında standart duruma göre motordan salınan NO emisyon değerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Maksimum momentin elde edildiği 1300 d/d motor hızında standart durumda 872 ppm olarak ölçülen NO değeri, DEE3' de 820 ppm, DEE5' de 813 ppm, DEE7' de ise 800 ppm olarak ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan DEE %99,5 saflık değerindedir. NO emisyonlarını tetikleyen ana mekanizma silindir içerisinde ulaşılan yüksek sıcaklıklardır [10]. Kullanılan DEE' in saflık derecesi dikkate alınarak termodinamiğin birinci yasasına göre adyabatik alev sıcaklıkları hesaplandığında; dizel yakıt kullanımında 2102 K olarak hesaplanan sıcaklık değeri DEE5 kullanıldığında 2100 olarak hesap edilmiştir. Sıcaklık değerindeki azalma miktarı NO emisyonlarının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Rakopoulos ve ark. [7], DEE karışımlarıyla yaptıkları çalışmada, DEE karışımları kullanıldığında silindir içi sıcaklığının azaldığını ve buna bağlı olarak NOx emisyonlarında düşmelerin meydana geldiğini vurgulamaktadır. Diğer taraftan dizel yakıtın gizli buharlaşma ısısı 250 kJ/Kg iken DEE' in 356 kJ/Kg' dır. Buda DEE karışımları kullanılması durumunda silindir içi sıcaklığının düşeceğinin bir göstergesidir. Silindir içerisinde NO emisyonunu etkileyen ikinci etken ise HFK' dır. Hava fazlalık katsayısı stokiometrik karışımdan biraz fakir karışım bölgesine geldiğinde dizel motorlarından maksimum NO salınırken daha fakir karışım

bölgelerinde NO oluşum oranının düştüğü vurgulanmaktadır [11]. Şekil 4 incelendiğinde DEE karışımları kullanıldığında HFK' nın oldukça fakir karışım oranlarına geldiği gözlemlenmektedir. Bu da DEE karışımları kullanılması durumunda NO emisyonlarının azalmasına neden olan diğer etkidir. Iranmanesh ve ark. [12], Yaptıkları çalışmada dizel içerisine DEE karışımları katıldığında (%5, %10, %15) NOx emisyonlarının azaldığını tespit etmişlerdir. Tudu ve ark. [13], DEE karışımlarının kullanılması durumunda dizel yakıtı göre NOx emisyonlarının azaldığını tespit etmişlerdir.

Motorda dizel ve DEE karışımlarının kullanılması durumunda tam yük şartlarında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen Duman Koyuluğu (%) değerleri değişimleri Şekil 8' de görülmektedir.

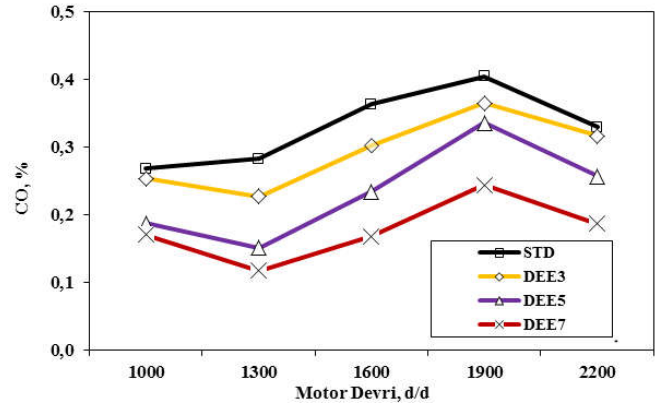


Şekil 8. Duman koyuluğu değişimleri (İs emissions changes)

Şekilden de görüldüğü gibi motorda DEE karışımları kullanıldığında standart motor verilerine göre is emisyonlarında azalmalar meydana gelmiştir. Maksimum momentin elde edildiği devir sayısı olan 1300 d/d' da standart durumda ölçülen duman koyuluğu değeri %57,7 iken, DEE3' te %49, DEE5' te %46 ve DEE7' de % 46,6 olarak ölçülmüştür. Standart duruma göre maksimum azalma miktarı %12 değerinde DEE5' de karışımı kullanımında elde edilmiştir. Dizel motorlarının yüksek hava fazlalık katsayısında çalışmalarına rağmen is emisyonlarının oluşum nedeni, silindir içerisinde yakıt/hava karışımının yeterince iyi karışmaması nedeni ile lokal zengin karışım bölgelerinin oluştuğu ve yanma için yeterli zamanın olmamasından kaynaklandığı bilinmektedir. Bu açıdan değerlendirildiğinde DEE karışımlarının kullanılması durumunda HFK' nın artmasına bağlı olarak motor daha fakir karışımlarda çalışmakta ve silindir içerisinde oluşan

lokal zengin karışım bölgelerinin azaldığı tahmin edilmektedir [7]. DEE karışımları kullanılarak yapılan birçok çalışmada İs emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir [5-9].

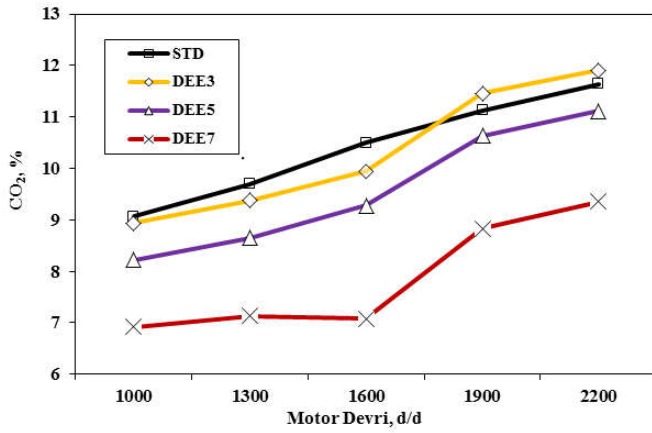
Şekil 9' da dizel ve farklı oranlarda DEE karışımları kullanılarak tam yük şartlarında ve farklı motor devirlerinde ölçülen CO emisyon değerleri görülmektedir.



Şekil 9. CO emisyonları değişimleri (CO emissions changes)

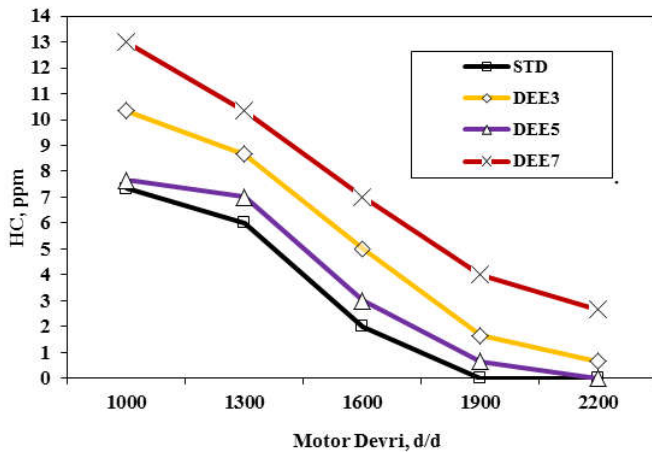
Şekil incelendiğinde standart duruma göre DEE karışımları kullanıldığında CO değerlerinde dikkate değer oranda bir azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Karışım içerisindeki DEE oranı arttıkça CO emisyonlarının azaldığı tespit edilmiştir. CO emisyonlarının motorda oluşum nedeni İs emisyonu ile hemen hemen aynı sebeplerden kaynaklanmaktadır. CO azalmasının nedeni DEE karışımları kullanıldığında DEE' in oksijen içeriği ve daha fakir karışımla yanma özelliğine bağlı olarak HFK' nın standart duruma göre artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde DEE karışımları kullanılması durumunda yapılan birçok çalışmada CO emisyonlarının azaldığı vurgulanmaktadır [6-9].

Motorda dizel ve DEE karışımlarının kullanılması durumunda tam yük şartlarında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen CO₂ değerleri değişimleri Şekil 10' da görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi DEE karışımları kullanıldığında CO₂ emisyon değerlerinde azalmaların meydana geldiği görülmektedir. Silindir içerisinde meydana gelen yanma olayı oldukça kompleks bir olaydır. CO₂ emisyonları tam yanma ürünüdür.

Şekil 10. CO₂ emisyonları değişimleri (CO₂ emissions changes)

DEE karışımları kullanılması durumunda oksijen içeriğinin artmasına bağlı olarak CO₂ emisyonlarının azalmasının sebebi şu şekilde izah edilebilir. DEE' in içerisindeki Karbon (C) atomu sayısı dizele göre oldukça azdır. DEE karışımları kullanılması durumunda standart dizel yakıtı içerisindeki C atomu sayısı 14,4 olarak alındığında DEE3' de C atomu sayısı 14' de, DEE5' de 13,8' e, DEE7' de ise 13,6' ya düştüğü anlaşılmaktadır. Tudu ve Patel [13], DEE karışımlarının kullanılması durumunda dizel yakıtı göre CO₂ emisyonlarının azaldığını tespit etmişlerdir.

Şekil 11' de dizel ve farklı oranlarda DEE karışımları kullanılarak tam yük şartlarında ve farklı motor devirlerinde ölçülen HC emisyon değerleri görülmektedir.

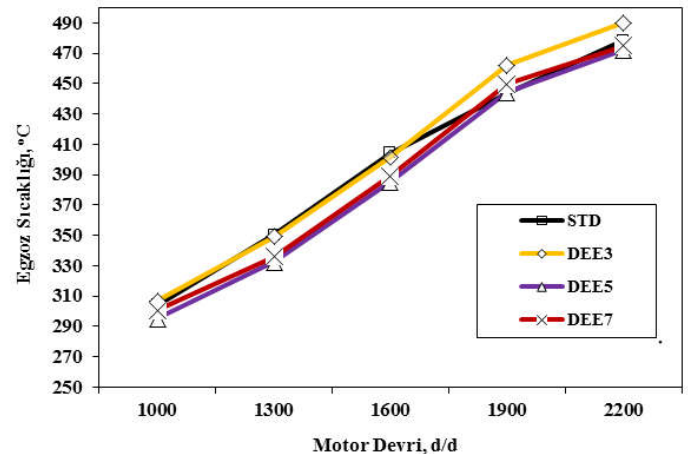


Şekil 11. HC emisyonları değişimleri (HC emissions changes)

Şekilden de görüldüğü gibi DEE karışımları kullanıldığında HC emisyonlarında artmalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Standart duruma göre en az artma miktarı DEE5 karışımı kullanımında ölçülmüştür. HC emisyonlarının artmasının birkaç sebebi olabilir. Bunlardan birincisi, DEE' in dizele göre daha yüksek

buharlaştırma ısısına sahip olması silindir içine enjekte edilen yakıtın buharlaşmasını geciktirmiş ve bu sebeple H/Y karışımı oluşumu zayıflamış olabilir. ikincisi, DEE karışımları kullanılması durumunda silindir içi sıcaklığının azalmasına bağlı olarak silindir cidarlarına yakın bölgelerde (silindir içi en soğuk bölgeler) alev sönmeleri meydana gelmesi HC emisyonlarını arttıracaktır. Diğer, dizel motorlarında yanma sonu ulaşılan yüksek sıcaklıklardan dolayı tam yanma ürünleri yüksek sıcaklık altında endotermik reaksiyon gerçekleştirerek parçalanmaktadır. DEE karışımları kullanılması durumunda DEE' in gizli buharlaştırma ısısının yüksek olmasına bağlı olarak silindir içi sıcaklıkların azalması bu termik disasiasyon reaksiyonlarını azaltmış olabilir. Son olarak DEE' in setan sayısının yüksek olmasından dolayı tutuşma gecikmesi esnasında kendiliğinden ateşleme olaylarının daha erken meydana gelmesi HC emisyonlarını arttıran bir sebep olabilir [14]. Literatürde de bazı çalışmalarda DEE karışımları kullanılması durumunda HC emisyonlarının arttığı vurgulanmaktadır [7,13].

Motorda dizel ve DEE karışımlarının kullanılması durumunda tam yük şartlarında yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ölçülen egzoz sıcaklık değerleri değişimleri Şekil 12' de görülmektedir.



Şekil 12. Egzoz sıcaklığı değişimleri (Exhaust temperature changes)

Motorda DEE karışımları kullanıldığında genel olarak egzoz sıcaklığının dizel yakıtı göre azaldığı 1900 d/d ve 2000 d/d motor hızlarında ise DEE3 karışımı kullanımında arttığı tespit edilmiştir. DEE karışımlarının kullanılması durumunda DEE' in gizli buharlaştırma ısısına bağlı olarak silindir içi sıcaklık değerlerinin azalması egzoz sıcaklığının da düşmesine neden olduğu düşünülmektedir.

4. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada tek silindirli bir dizel motorunda DEE-Dizel karışımlarının motor performans ve emisyon karakteristiklerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada motorda saf dizel ve 3 farklı DEE3 DEE5 ve DEE7 karışımları yakıt olarak kullanılarak farklı motor devirlerinde tam yük şartlarında deneyler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların incelenmesi sonucu aşağıdaki bulgular sağlanmıştır.

1. Motorda DEE karışımları kullanıldığında standart motor verilerine göre motor döndürme momenti ve efektif gücünde ve özgül yakıt sarfiyatında azalmaların, efektif verimde ise artmaların olduğu tespit edilmiştir. Performans parametreleri açısından en uygun karışım DEE5 olduğu gözlemlenmiştir.
2. DEE karışımlarının kullanılması durumunda dizel yakıtta göre NO emisyonlarında %12' ye varan oranda azalma, duman koyuluğu(is) emisyonlarında %11' e varan oranda azalma, CO emisyonlarında dikkate değer oranda azalma, CO2 emisyonlarında azalma ve HC emisyonlarında ise artmaların meydana geldiği tespit edilmiştir. Egzoz sıcaklığında ise DEE karışımları kullanıldığında genel olarak azalmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde dizel motorlarında DEE kullanımı özellikle NO ve İS emisyonlarında dikkate değer oranda azalma sağlamaktadır. Aynı zamanda ÖYS ve efektif verimde de iyileşmelere neden olduğu tespit edilmiştir.

Teşekkür

Bu çalışma Sakarya Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeler Koordinatörlüğü tarafından (FBYLTEZ-2012-50-01-046) desteklenmiştir. Maddi desteklerinden dolayı SAÜ, BAPK' a teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- [1] Ayhan, V. "Bir dizel motoruna buhar enjeksiyonunun NOx ve is emisyonlarına

etkisinin araştırılması", *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi, Doktora Tezi*, 2009.

- [2] <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=24595>, Son erişim tarihi: 05.06.17.
- [3] Sezer İ. "Dietil Eter-Motorin Karışımlarının Motor Performansına Etkilerinin Deneysel İncelenmesi", *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt* 27, No 1, 117-124, 2012.
- [4] Arcoumanis, C., Bae, C., Crookes, R., Kinoshita, E. "The potential of di-methyl ether (DME) as an alternative fuel for compression-ignition engines: a review". *Fuel* 87:1014-30, 2008.
- [5] Cheng, A.S., Dibble, R.,W. "Emissions performance of oxygenate-in-diesel blends and Fischer-Tropsch diesel in a compression ignition engine". *SAE Paper* no. 1999-01-3606; 1999.
- [6] Lee, S., Kim, T.Y. "Performance and emission characteristics of a DI diesel engine operated with diesel/DEE blended fuel", *Applied Thermal Engineering* 121; 454-461, 2017.
- [7] Rakopoulos, D.C., Rakopoulos, C. D., Giakoumis, E.G., Dimaratos, A. M. "Characteristics of performance and emissions in high-speed direct injection diesel engine fueled with diethyl ether/diesel fuel blends", *Energy*, 43; 214-224, 2012.
- [8] Subramanian, K.A., Ramesh., A. "Operation of a compression ignition engine on diesel-diethyl ether blends", *In: Proceedings of 2002 ASME internal combustion engines division fall technical conference (ICEF2002), New Orleans, LA, vol. 39; Sept. 8-11, p. 353-60, 2012.*
- [9] Mohanan, P., Kapilan, N., Reddy, R.P. "Effect of diethyl ether on the performance and emission of a 4-S DI diesel engine", *SAE Paper* no. 2003-01-0760; 2003.
- [10] Ayhan, V. "Direkt enjeksiyonlu bir dizel motoruna buhar ve farklı yöntemlerle su gönderiminin performans ve NOx emisyonlarına etkilerinin incelenmesi", *SAÜ Fen Bil Der.*, 20. Cilt, 3. Sayı, s. 463-471, 2016.

- [11] Soruşbay, C. “İçten Yanmalı Motorlarda Egzoz gazları Emisyonu”, *Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi*, 1989.
- [12] Iranmanesh, M., Subrahmanyam, J.P., Babu, M.K.G. “Application of diethyl ether to reduce smoke and NOx emissions simultaneously with diesel and biodiesel fueled engines”. In: *Proceedings of 2008 ASME international mechanical engineering congress and exposition (IMECE2008), Boston, MA; Oct. 31-Nov. 6, p. 77-83, 2008.*
- [13] Tudu, K., Murugan, S., Patel, S.K., “Effect of diethyl ether in a DI diesel engine run on a tyre derived fuel-diesel blend”, *Journal of the Energy Institute*, 89, 525-535, 2016.
- [14] Heywood, J.B. “Internal combustion engine Fundamentals”, *New York, USA: McGraw-Hill*; 1988.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 02.08.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 20.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.332336	

Kabiliyet odaklı sanayi kümelenmesi: Sakarya Üniversitesi teknokent örneği

Berrin Denizhan*¹ Ayten Yılmaz Yalçın Ebru Gizem Yılmaz Ecem Bayar

ÖZ

Sanayi kümelenmesi, bölgesel kalkınmanın en başarılı araçlarından biri olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmanın amacı ise kabiliyet odaklı kümelenme yaklaşımını Sakarya Üniversitesi Teknokent'te yer alan firmaların kabiliyetlerinin ortaya çıkarılması ile ortaya koymaktır. İlk olarak Teknokent'te faaliyet gösteren firmalara anket uygulaması ile firma kabiliyetleri ortaya çıkarılmıştır. Anketler SPSS 18 programı ile değerlendirilmiştir. Anket sonucu elde edilen kabiliyet alanlarına göre derece sıralama ve kümeleme (ROC) algoritması ile firmaların kümelenmesine yönelik önerilerde bulunulmuştur. ROC algoritması sanayi kümelenmesi üzerinde uygulanabileceği gibi kabiliyet odaklı kümelenme yaklaşımı Teknokentin verimliliğini de artırabilecektir. Sakarya bölgesinin kalkınmasına etki edebilecek potansiyel gücün ortaya çıkarılmasına da katkı sağlayacaktır

Anahtar Kelimeler: sanayi kümelenmesi, derece sıralama (ROC) algoritması, bölgesel kalkınma

Capability focused industrial clustering: Sakarya University technopolis case

ABSTRACT

One of the most successful tools of regional development is considered as an industrial clustering approach. It was aimed to reveal the abilities of firms in Sakarya University Technopolis and to demonstrate a capability-oriented clustering approach. Within this scope, it is aimed to develop capability-focused clustering approach by uncovering company capabilities with the application of company survey in Technopolis. Survey application evaluated by SPSS 18 program and after that rank order clustering (ROC) algorithm applied on survey data. It shows that the ROC algorithm can be applied on the industrial cluster as well as the ability-based cluster approach, which will also increase Technopolis productivity. It will also contribute to revealing the potential power that can influence the development of the Sakarya region.

Keywords: industrial clustering, ROC algorithm, regional development

* Corresponding Author

¹ Sakarya University, Department of Industrial Engineering, denizhan@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ [INTRODUCTION]

Kümelenme ilk olarak 1990'lı yıllarda Michael Porter tarafından önerilmiştir [1]. Sanayi kümeleri denildiğinde ise belli bir coğrafi alanda karşılıklı olarak buldukları ilişki ile birbirlerine değer katan kurum, kuruluş, tedarikçi, kaynak olan diğer tüm oluşumlar, hizmet ya da ürünlerin sunulduğu tüm kişi yada firmalar, sivil toplum kuruluşları ve kamuya ait yapılanmalar, yerel yönetimleri içine alan bir ağ akla gelmektedir. [1,10]. Kümelenmenin temelinde sektörel rekabetçilik yatmaktadır.

Kümelenme aynı zamanda 1970'li yıllarda ortaya çıkan "Bölgesel Kalkınma" yaklaşımının önemli bir aracı olarak ülkelerin kalkınma stratejilerinde yer almaktadır. 90'lı yıllar sona ererken girişimcilik kavramı artık bölgesel ekonomiyi de kapsayacak şekilde bazı stratejik yaklaşımlar (yerel ortaklıklar vs) ile birlikte ele alınmaya başlanmıştır. Bu farklı stratejiler gelir dağılımındaki dengesizlikler yada eşitsizliklerin bölgesel olarak artması sebeplerinden doğmuştur [18]. Bölgesel ekonomik gelişmişliği etkileyen sosyal, kültürel ve politik dinamiklerin tamamını içine alması da, günümüzün en iyi bölgesel gelişme kimliği olarak kabul edilmektedir [9].

Amerika da Silikon Vadisi başta olmak üzere Porter'in rekabet modeli temel alınarak birçok başarılı uygulamalar Avrupa da da yer almaktadır. Birleşmiş milletler sanayi geliştirme organizasyonuna (*United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)*) göre kümelenme çalışması 3 ana boyutu içermektedir. Kümelenmenin organizasyonu ve geliştirilmesi, Küçük ve Orta Büyüklükteki işletmeler (KOBİ) arasında bir network oluşturulması ve KOBİ ve diğer ana üreticiler arasındaki ağın geliştirilmesi. Bölgesel bazda küme çalışmaları, üniversiteler, ilin ve ildeki sanayi topluluğunun ve destek kuruluşların çabaları ile yürütülmektedir. Hepsinden önemlisi Küme çalışması bir teşvik faaliyeti değil doğrudan katılımı gerektiren bir çalışmadır.

Birbirleriyle rekabette olan sektörler, kümelenme faaliyetleri ile desteklenip gelişmelerinin ve böylelikle bölgesel ve milli rekabet konusunda ilerlemeler gerçekleşmesi sağlanmaktadır. Bir küme çok çeşitli şekillerde bilgi ve teknoloji tabanlı ve yenilikçi olabilir. Kuzey Avrupa

ülkeleri bu konuda önemli bir örnek teşkil etmektedir. Belirli bir dereceye kadar düşük teknoloji ekonomiler olarak ifade edilebilen Danimarka ve Norveç, geleneksel sektörlere yeni teknolojileri adapte ederek teknoloji kullanımını artırmış ve geleneksel sektörlerini yenilikçi üretime yönlendirmişlerdir. Bu durum, Ar-Ge konusunda daha kısıtlı kaynak sahibi olan ülkeler için belirli bir rota çizmektedir. Bu anlamda, katma değer; tasarım, organizasyonel değişiklik, sınırlı Ar-Ge ve sermaye gerektiren, ancak, ürünlerin kalite ve imajlarını iyileştiren diğer stratejilerle artırılabilir. Bu durumun tam tersi olarak, İsveç ve Finlandiya'da küreselleşmiş işletmelerin gelişimi yüksek Ar-Ge yatırımları ile şekillendirilmiştir. Küçük işletmeler Finlandiya'da sürekli olarak desteklenirken, İsveç'te kurulu sanayiye zorlamak için oluşturulan yeni teknoloji temelli işletmeler daha az çekici bir konumda bulunmaktadır.

Kümelenme olgusuyla beklenen şey, ortak coğrafyadaki firma, üniversite, kamu kurum-kuruluşları, sivil toplum örgütleri, ArGe yapılanmaları vs gibi tüm ortakları aynı çatı altında toplamaktır [18]. Kümelenmenin gerçekleşmesi için, firmaların kümelenmenin sağlamış olduğu faydalardan yararlanmaları gerekmektedir. Aynı zamanda mevcut işgücü ve bölgenin bilgi ve tecrübelerine dayalı olarak yenilikçi fikirler ve işgücünden yararlanmalıdır. Kümelerin, genellikle işletmelerden gelen doğal talepler ile oluştuğlarında başarılı olma olasılıkları artmaktadır. Ancak bu durum her zaman oluşmamış olabilir. Bir itici güç olarak kalkınma ajansları, teknoparklar gibi bölgedeki destek kuruluşlarının yönlendirmesi ile de oluşması mümkündür.

İtalya da, tekstil, deri, mücevher, optik çerçeve üzerinde kümelenme çalışmaları mevcuttur. Hindistan'da Pune Şehrinde ise yiyecek işleme üzerine bir kümelenme çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada bölgede yer alan katılımcılar gıdalara hile karıştırmanın en büyük gelişim engeli olduğunu belirtmişlerdir. Ortak test merkezleri kurularak üreticilerin bu üretim kurallarına uyması sağlanmıştır. Bu kümelenme çalışması sonucunda kanunlarda değişiklik ve yasalara uyma oranı artmıştır.

Bagru ise kumaş üzerine tahta baskılarıyla ünlü Hindistanda bir şehirdir. Burada da son 20 yıldır bu baskı sisteminde hiçbir gelişme olmadığı

gözlemlenmiş ve kümelenme çalışması yapılmıştır. Yeni modeller ve kalıplar oluşturularak kumaş tekstili konusunda kümelenme gelişme sebebi olmuştur. Küme girişimlerinin farklı ihtiyaçları olacağı göz önünde bulundurarak bu ihtiyaçları karşılayacak özel küme destek programlarının fonksiyonel programlar kapsamında uygulanmasının daha etkin sonuçlar vermesi beklenmektedir [11, 13].

Kümelenmede en zor unsur ise bir araya gelmenin güçlüğüdür. Bunun bazı sebepleri vardır. Şirketlerin gerçek üstünlüklerinin ve geliştirilmeye açık noktalarının olası kümedeki diğer işletmelerin çıkarları ile paralellik göstermesi gerekmektedir. Aksi durumda uzun dönemli başarı elde etmek zorlaşmaktadır. Bu sebeple, bu çalışmada Sakarya Üniversitesi Teknoparkta yer almakta olan firmalar baz alınarak mevcut şirketlerin hangi kabilyetler doğrultusunda birbirine destek verip ortak çıkarları için ve rekabet güçlerini artırabilmek için kümelenebilecekleri araştırılmıştır. Aslında kavramsal olarak bakıldığında da teknoparklar bir küme olarak kabul edilebilir. Bunun için de Teknoparklar bölgenin potansiyel gücünü ve endüstriyel alandaki ihtiyaçlarını destekleyecek nitelikte bir strateji oluşturmalıdır. Önerilen bu çalışma aynı zamanda teknoparkların oluşturabilecekleri bu stratejileri de destekleyecektir.

Literatürde küme oluşumunu destekleyecek alanlar üzerine çalışmalar mevcuttur. 2004 yılında küme oluşumunda firmaları bir araya getirecek bilgi tabanlı bir yapı oluşturulmuştur. Ancak bu çalışmada kümenin sürdürülebilirliği için liderlik, firmalar arası iletişim ve bilgi paylaşımının nasıl gerçekleşeceği, ortak alanların çıkarılması başlıkları genel olarak ele alınmıştır[10]. İsviçre’de yapılan bir başka araştırmada bölgesel kalkınma açısından mezunların kabilyetleri üzerine bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırma ile bölge sanayisinin gelişimine yön verecek alanlar tespit edilmektedir[18]. 2014 yılında yapılan başka bir çalışmada ise bir bölgedeki kümelenmenin tek tek her bir endüstri üzerinde nasıl etkileri olduğu araştırılmıştır. Kümelerde istihdam ve inovasyon arasında tamamlayıcı bir ilişki olduğu ortaya çıkmıştır. Kümelenme ile bölge endüstrisindeki işgücü kalitesi ve patent sayılarında artış gözlemlenmiştir. Aynı zamanda güçlü kümelerin bölgede yeni endüstri oluşumuna da katkıda bulunduğu araştırma sonuçları arasındadır.

Yöntem olarak ise ekonometrik bir model önerilmiş ve yakınlık ilişki matrisi kullanılmıştır [5].

Derece Sıralama algoritması (Rank Order Clustering (ROC) ise ilk olarak 1980 yılında King tarafından makine hücrelerinde parça ailelerinin oluşturulması için önerilen bir algoritmadır. Bu algoritma genellikle makine hücreleri ile ilişkili parça sayıları arasında denge kurmaya çalışmaktadır[8].Bu yöntem problemi ayrıştırarak verileri yeniden gruplayarak organize edebilmektedir. Bu sebeple üretimde yaygın olarak kullanılmıştır. İlerleyen yıllarda ise görüntü işleme ve üretimdeki birçok alanda uygulamaları yapılmış ve bu yöntem üçyüzden fazla yayında kullanılan bir yöntemdir.[2]. Jiang ve diğerlerinin (2004) çalışmalarında mikroarray teknolojisi ve gen ekspresyonu verileri üzerine kümelenmenin uygulaması anlatılmıştır [7].

Bu çalışmada ise kabilyet odaklı yaklaşım önerilmektedir. Böylece bir firma aynı sektörde yer alsın ya da almasın bir başka firma ile aynı küme içinde birbirine destek verebilecektir. Bu çalışmanın ana hedefi de sektörel kümelenmeye alternatif bir bakış açısı ile firmaların ihtiyaç ve kabilyetlerine odaklanmaktadır. Yöntem olarak ise bir makine gruplama yöntemi olan ROC algoritması kullanılmaktadır. Bugüne dek yapmış olduğumuz literatür araştırmasına göre ilk olarak bir sanayi kümesi uygulamasında ROC algoritması kullanılmaktadır. Teknoparktaki firmalar rekabet ederken hem Teknoparkın rekabet gücünü artıracaktır. Bu kapsamda ilerleyen bölümlerde, genel olarak Türkiye de kümelenme politikaları, Teknokent örneğimiz için kullanılan metotlar ve uygulama sırası ile anket analizi ve ROC algoritması uygulaması ile açıklanmaktadır. Son bölümde ise bulgular ve öneriler sunulmuştur.

2. TÜRKİYE’DE SANAYİ KÜMELENME POLİTİKASI [INDUSTRIAL CLUSTERING POLICY IN TURKEY]

Ülkemizde “Küme” terimine denk olarak Bölgesel yığınlar kavramı ifade edilmektedir ki bu gruba organize sanayi bölgeleri, serbest ticaret bölgeleri ve teknoparklar dahil edilebilir. Adıyaman, Şanlıurfa ve Çukurovada yer alan kümelenme projeleri de bunlardan bazılarıdır. Bilgi veya üretim ağı olarak bir araya gelen ancak tam olarak kümelenme sayılamayacak uygulamalar da

mevcuttur. Bunlara İstanbul'da mücevher işleme faaliyetini, Denizli, Bursa ve İstanbul tekstil sanayiini, Ankara, Kayseri ve Bursa'da mobilya sanayini örnek olarak verebiliriz.[18].

Kümelenme kapsamında Türkiye'de yapılan ilk araştırmalar Türkiye'nin Küresel Arenada Ekonomik Rekabet Gücü'nün Artırılması Projesi (CAT Platformu) ile başlamış ve bu yapının ilerleyen süreçlerde Uluslararası Rekabet Araştırmaları Kurumu (URAK) haline gelmesi ve AB tarafından sağlanan fonlar ile de bu çalışmalar hız kazanmıştır. [17].

Kümelenme faaliyetlerinin firmaya, bölgeye ve ülkeye olan faydaları; bölgede sektörle ilgili bütün bileşenlerin birlikte olması, her firmanın kendi uzmanlık alanında yoğunlaşması ve dolayısıyla iyi olmadıkları alanlarla vakit kaybetmemeleri, nitelikli işgücüne erişim kolaylığı, işletmelere yenilik ve ArGe faaliyetlerinde düşük maliyet sunması ve ülke genelinde teknoloji transferine imkân sağlaması olarak sıralanabilir.

Kümelenmenin bir ülke politikası haline gelebilmesi için Avrupa birliği kapsamında "Ulusal Kümelenme Politikasının Geliştirilmesi Projesi" hazırlanmış ve 6 Milyon Euro finansman ile; kümelenmenin aşamaları oluşturulmuş, işbirliği yapılabilecek alanlar belirlenmiş ve desteklenmiştir[4].

Türkiye'de de kümelenmenin bu faydalarından faydalanabilmek amacı ile altyapı çalışmaları ve destekler yürütülmektedir. Kümelenme stratejisinin oluşturulması kapsamında tablo 1 de yer alan öncü pilot bölgeler de oluşturulmuştur. [6].

Tablo 1. Türkiye'de Sektörel Bazda Yol Haritası Belirlenen ve Hazırlanan Kümeleri ve Pilot İlleri Sunan Tablo [17].

Pilot Kümeler İl	Sektör
Kayseri	Mobilya
Gaziantep	Makine Halısı , Ayakkabı
Kahramanmaraş	Tekstil
Sivas	Doğal Taşlar
Yozgat	Mobilya
Trabzon	Ağac İşlemeciliği
Samsun	Dış Ticaret İşlemleri
Malatya	Kayı
Erzurum-Kars	Kış Turizmi
Mardin	Turizm
Çorum	Makine
Mersin	İşlenmiş Gıda İş Kümesi
Ankara	Yazılım İş Kümesi
Denizli-Üşak	Ev Tekstili İş Kümesi
Konya	Otomotiv Yan Sanayi Kümesi
Muğla	Yat Üretimi ve Yat Turizmi İş Kümesi
İzmir	Organik Gıda İş Kümesi
Marmara	Otomotiv İş Kümesi
Mansa	Elektrik Elektronik Aletler İş Kümesi
Eskişehir-Bilecik-Kütahya	Seramik İş Kümesi

3. UYGULAMA VE METOT [METHOD AND APPLICATION]

Önerilen kabiliyet odaklı kümelenme yaklaşımının uygulama yeri olarak Sakarya Üniversitesi Teknokent seçilmiştir. Sakarya Üniversitesi Teknokenti 2010 yılından itibaren toplamda 63 firma ile faaliyet göstermektedir. Ancak uygulama yapıldığı sıradaki toplam firma sayısı 51 dir. İlk olarak Teknokente yer alan firma kabiliyetlerinin ortaya çıkarılmasına yönelik veri toplamak amacı ile yedi temel kabiliyet alanı belirlenmiştir. Bunlar: Ar-Ge, Yazılım, İmalat, Bakım-Onarım, Planlama, Lojistik ve Pazarlama-Satış bölümlerinden oluşmaktadır. Toplam 160 adet sorudan oluşan anket uygulanmıştır. Her bir bölümdeki sorular literatürde yer alan bilgilere göre hazırlanmıştır.

Bu anket çalışması Sakarya Üniversitesi Teknokent bünyesinde faaliyet gösteren 51 firmaya iletilmiş ve 18 firmadan geri dönüş alınmıştır. Elde edilen veriler en çok kullanılan analiz programlarından birisi olan SPSS (Statistical Package for the Social Sciences) 18 kullanılarak istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Analiz doğrultusunda firmalar arasında yukarıda da ifade edilen 7 bölüme göre her bölüm için ortaya çıkan kabiliyetler belirlenmiştir. Bu anket aynı zamanda Sakarya Üniversitesi Teknokent'te yer alan firmaların kabiliyet analizini ve hangi alanlarda daha üstün ve/veya daha zayıf olduklarını da sunmaktadır. Kabiliyetleri belirlenen bu firmalara sıralama amacıyla ROC

algoritması ve ortalama esaslı matematiksel yöntem uygulanarak kümeleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan küme / kümelerde yer alan firmaların, ankette ortaya çıkan kabilyetli alanlara yönelik olarak aynı kümedeki firmaların hangi yeteneklerinden fayda sağlayabileceklerinin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır.

3.1. Anket çalışması [Survey study]

Firmalara uygulanan anketler neticesinde elde edilen veriler SPSS paket programına aktarılmıştır.

Her firmanın her bölümü için SPSS'te puanlamanın yapıldığı ekran görüntüsü Şekil 1.'de gösterilmiştir. Katılımcı firmaların isimleri gizli tutularak alfabetik olarak isimlendirilmiştir.

Firma	AR-GE	YAZILIM	İMALAT	BAKIM	PLANLAMA	LOJİSTİK	PAZARLAMA
A	12,00	8,00	8,00	1,00	4,00	1,00	3,00
B	18,00	8,00	0,00	1,00	4,00	0,00	3,00
C	9,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D	17,00	13,00	0,00	1,00	2,00	0,00	5,00
E	26,00	10,00	9,00	4,00	3,00	6,00	3,00
F	27,00	12,00	20,00	6,00	4,00	0,00	5,00
G	20,00	14,00	2,00	2,00	7,00	0,00	5,00
H	31,00	7,00	11,00	1,00	4,00	6,00	3,00
I	27,00	13,00	1,00	1,00	4,00	0,00	4,00
J	18,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	14,00	10,00	0,00	1,00	3,00	0,00	3,00
L	33,00	13,00	25,00	5,00	5,00	5,00	5,00
M	19,00	14,00	15,00	1,00	4,00	0,00	3,00
N	2,00	10,00	0,00	1,00	3,00	0,00	3,00
O	11,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00
P	38,00	8,00	17,00	6,00	4,00	2,00	3,00
R	9,00	8,00	0,00	1,00	2,00	0,00	5,00
S	16,00	5,00	0,00	1,00	2,00	0,00	4,00
Ortalama lar	19,28	9,72	6,00	1,83	3,06	1,11	3,28

Şekil 1. Firmaların Bölümlere Göre Puanları

3.2. Anket Cevaplarının Değerlendirilmesi ve Yetenek Kümelerinin Oluşturulması [Evaluation of Survey Responses and Creation of Ability Clusters]

Tablo 2'de anket uygulanan firmalardan alınan yanıtlara göre, firmaların bölümlerine göre tespit edilen puan listesi verilmiştir.

Tablo 2. Firmaların Bölümlerine Göre Puan Tablosu

Firmalar	AR-GE	YAZILIM	İMALAT	BAKIM	PLANLAMA	LOJİSTİK	PAZARLAMA
A	12,00	8,00	8,00	1,00	4,00	1,00	3,00
B	18,00	8,00	0,00	1,00	4,00	0,00	3,00
C	9,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
D	17,00	13,00	0,00	1,00	2,00	0,00	5,00
E	26,00	10,00	9,00	4,00	3,00	6,00	3,00
F	27,00	12,00	20,00	6,00	4,00	0,00	5,00
G	20,00	14,00	2,00	2,00	7,00	0,00	5,00
H	31,00	7,00	11,00	1,00	4,00	6,00	3,00
I	27,00	13,00	1,00	1,00	4,00	0,00	4,00
J	18,00	6,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K	14,00	10,00	0,00	1,00	3,00	0,00	3,00
L	33,00	13,00	25,00	5,00	5,00	5,00	5,00
M	19,00	14,00	15,00	1,00	4,00	0,00	3,00
N	2,00	10,00	0,00	1,00	3,00	0,00	3,00
O	11,00	8,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00
P	38,00	8,00	17,00	6,00	4,00	2,00	3,00
R	9,00	8,00	0,00	1,00	2,00	0,00	5,00
S	16,00	5,00	0,00	1,00	2,00	0,00	4,00
Ortalama lar	19,28	9,72	6,00	1,83	3,06	1,11	3,28

Yine bu verilerle elde edilen grafiklerde baz alınan yedi temel bölüme göre firmaların değerlendirilmesi sağlanmıştır. Ankete katılan tüm firmaların belirlenen yedi bölümü için puanlama grafiği oluşturulmuştur. Bu grafikler bölüm bazında firmaların güçlü ve zayıf yeteneklerinin analizine de imkân sağlamıştır.

Tablo 2.'deki verilerden de faydalanarak bölüm bazında elde edilen puanların ortalamaları esas alınarak yetenek puanlama sıralaması yapılmış ve ortalamanın üstünde kalan firmalar da kendi aralarında tekrar ortalama altı ve üstü değerlere göre yetenek puanlarına göre sıralanmıştır. Bu sayede hangi firmaların destek vereceği, hangi firmaların destek alacağı belirlenecektir. Bu belirleme işlemi ile kabilyet odaklı kümeleme faaliyetinin temeli gerçekleştirilmiş olmuştur.

Oluşturulan kümelere bölüm bazında yüksek yeteneğe sahip olan firmalar destek verecek firma olarak atanmış, düşük yetenek puanına sahip firmalar ise destek almak isteyen firmalar Tablo 3’ de görüldüğü gibi atanmıştır. Aşağıda oluşturulan bu kümelere dair bilgiler bulunmaktadır.

Ar-Ge Kümesi: Yapılan değerlendirme sonrasında Ar-Ge yetenek puanlarının yüksekliği sebebiyle P, L ve H firmaları bu kümede destek verebilecek firmalar olarak yer almışlardır. Düşük ar-ge yetenek puanına sahip A , O, C, R ve N firmaları ise ar-ge kümesinde bulunarak bahsedilen P, L ve H firmalarından destek alabileceklerdir.

Yazılım Kümesi: Anketlerden alınan cevapların analizi sonucunda G, M, D, I ve L firmalarının yazılım yetenek puanlarının yüksek olması ile kümede destek verebilecek firmalar olarak yer almışlardır. Düşük yazılım yetenek puanına sahip H, J, S firmaları ise yazılım kümesinde bulunarak aynı kümedeki yüksek yazılım yeteneğine sahip olan firmalarda destek alabileceklerdir

İmalat Kümesi: İncelenen veriler doğrultusunda P, F ve L firmalarının imalat yetenek puanlarının yüksek olması ile kümede destek verebilecek firmalar olarak yer almışlardır. Düşük imalat yetenek puanına sahip B, O, C, D, J, K, S, R ve N firmaları ise imalat kümesinde bulunarak bahsedilen yüksek imalat yeteneğine sahip olan firmalardan destek alabileceklerdir

Planlama Kümesi: Elde edilen puanların firmalara göre kıyaslanması sonucunda L ve G firmalarının yüksek planlama yeteneğine sahip oldukları anlaşılmıştır. Yine aynı şekilde puanlara göre firmaların kıyaslanması sonucunda C, J, O firmalarının planlama konusunda zayıf oldukları anlaşılmıştır. Bu nedenle bu firmaların planlama yeteneği yüksek olan L ve G firmaları ile aynı küme içerisinde yer aldığında destek almaları kolaylaşacaktır. Bu sebeple oluşturulan Planlama Kümesine dahil edilmişlerdir.

Bakım Kümesi: F, P Teknolojileri ve L firmalarının yüksek bakım-onarım yeteneğine sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu firmalar oluşturulan bakım-onarım kümesi içerisinde yer alarak düşük

bakım-onarım yeteneğine sahip C, J ve O firmalarına destek olabileceklerdir

Pazarlama-Satış Kümesi: Yapılan analiz sonucunda G, D, F, R ve L firmalarının pazarlama-satış yetenek puanlarının yüksek olması ile kümede destek verebilecek firmalar olarak yer almışlardır. Düşük pazarlama-satış yetenek puanına sahip O, C ve J firmaları ise pazarlama-satış kümesinde bulunarak aynı kümedeki yüksek pazarlama-satış yeteneğine sahip olan firmalardan destek alabileceklerdir.

Tablo 3. Kabilyet alanlarına göre kümelere atanan firmalar

	Yüksek Kabilyetli Firmalar	Düşük Kabilyetli Firmalar
Arge Kümesi	P,L,H	A,O,C,R
Yazılım	G,M,D,I,L	H,J,S
İmalat	P,F,L	B, O, C, D, J, K, S, R ve N
Planlama	L,G	C, J, O
Bakım	F,P,T	C,J,O
Pazarlama Satış Kümesi	G, D, F, R ve L	C,J,O
Lojistik Kümesi	E, H ve L	C, J, B, D, F, G, I, K, M, N, R, S ve O

Lojistik Kümesi: E, H ve L firmalarının yüksek lojistik yeteneğine sahip olduğu anlaşılmıştır. Bu firmalar oluşturulan lojistik kümesi içerisinde yer alarak düşük bakım-onarım yeteneğine sahip C, J, B, D, F, G, I, K, M, N, R, S ve O firmalarına destek olabileceklerdir.

3.3. Derece Sıralama (ROC) Algoritması ile Yetenek Kümelerinin Oluşturulması [Creating Ability Clusters with ROC Algorithm]

Kümeleme tekniklerinden matris esaslı makine-parça ilişkilerine dayanan gruplamalar farklı uygulama alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. ROC (Rank Order Clustering-Derece Sıralama Kümeleme) algoritması da King tarafından geliştirilen ve 50 yıldan fazla zamandır kümeleme için etkin bir şekilde kullanılan tekniklerdendir. Bu algoritma imalat sistemlerinde makine parça ailelerini düzenleyerek oluşturulan matrislerde anadiyagonal üzerinde gruplar oluşturmaya imkan vermektedir [8, 3, 1]. Bu algoritmanın adımları aşağıda verilmiştir [1]:

Adım1: $n*m$ matrisi oluşturulur. n parça sayısını m ise makine sayısını göstermektedir. b_{ij} (Parça ve makine için ikili sayı)

Adım 2: Her i satırı için hesaplama yapılır

$$\sum_{i=1}^m b_{ij} * 2^{m-j}$$

Adım 3: Hesaplamalara dayanarak satırlar azalan düzende yeniden sıralanır

Adım 4: Her j satırı için hesaplama yapılır

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} * 2^{n-i}$$

Adım 5: Sütunlar, hesaplamalara dayanarak azalan düzende yeniden sıralanır.

Adım 6: 3. ve 5. adımlarda herhangi bir değişiklik gözlenene kadar 1. adımı tekrarlanır

Adım 7: Dur

ROC algoritması bu çalışmada firma-kabiliyet matrisi oluşturulması için kullanılmıştır. Makinelerin bulunduğu hücrelerde firmalar, parçaların bulunduğu hücrelerde ise departman yetenekleri ele alınarak matris oluşturulmuştur. ROC algoritması için oluşturulan matriste firma yetenekleri göz önünde bulundurularak yetenekli kabul edilen firmalar için "1" değeri verilmiştir. Yetenekleri gösteren "1" değerleri ROC algoritmasına girilerek elde edilen matris görüntüsü Şekil 3.'te gösterilmiştir.

Firmaların bölümlere göre kabilyet puanlarının SPSS 18 paket programından alınmasıyla firmaların bölümlerine göre puanlar tablo 2. de oluşturulmuştu. Tablodan da görülebileceği gibi her bölümün puan ortalamaları alınmıştır. Her bir firma için bölüm bazında puanlara bakıldığında ortalama puanın üstünde puan alan firmalar yetenekli kabul edilmiştir. Ortalama puana erişememiş firmalar ise ortalamanın altında olduğu için yeteneksiz kabul edilmiştir.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
M1			1		1		
M2					1		
M3							
M4		1					1
M5	1	1	1	1		1	
M6	1	1	1	1	1		1
M7	1	1		1	1		1
M8	1		1		1	1	
M9	1	1			1		1
M10							
M11		1					
M12	1	1	1	1	1	1	1
M13		1	1		1		
M14		1					
M15							
M16	1		1	1	1	1	
M17							1
M18							1

Şekil 2. ROC Algoritması Veri Giriş Ekran Görüntüsü

Şekil 2.'de dağınık bir şekilde görülen yetenekler algoritmanın çalıştırılmasıyla firma-yetenek matrisi kendi içinde düzenlenmiştir. Bu duruma ait yetenek matrisi görüntü ise Şekil 4'de verilmiştir.

	P1	P2	P4	P3	P5	P7	P6
M12	1	1	1	1	1	1	1
M6	1	1	1	1	1	1	
M5	1	1	1	1			1
M7	1	1	1		1	1	
M9	1	1			1	1	
M16	1		1	1	1		1
M8	1			1	1		1
M13		1		1	1		
M4		1				1	
M14		1					
M11		1					
M1				1	1		
M2					1		
M17						1	
M18						1	
M3							
M10							
M15							

Şekil 3. ROC Algoritmasında Düzenlenmiş Yetenek Matrisi

Şekil 3'de görüldüğü üzere firmaların ve yeteneklerin sıraları değişmiştir ve algoritma neticesine göre tek bir tane küme oluştuğu görülmektedir. Ancak matriste M12 olarak yer alan L firmasının tüm departmanlarda yetenekli olduğu görülmektedir. L firmasının diğer firmalara her departman için destek olabilecek altyapıya sahip olduğu anlaşılmaktadır. Aynı şekilde matriste M3,M10,M15 olarak yer alan C, J ve O firmalarının yedi departmanda da yeteneğe sahip olmadığı görülmektedir. Bu firmaların da dışarıdan destek alabilecek firmalar olduğu

anlaşmaktadır. Bu durumda her konuda yetenekli olan firma/firmalar bir küme oluşturacak şekilde, hiçbir konuda yeteneği olmayan firma/firmalar ise ayrı bir küme oluşturacak şekilde ele alınmıştır.

Yapılan bu değerlendirmelere göre ROC algoritmasının yorumlanmasıyla elde edilen üç adet küme yetenek bazında ele alındığında şu sonuçlar elde edilmiştir:

Yedi alanda da yeteneği olan L firmasının diğer firmalara destek verebilecek niteliğe sahip olmasından dolayı tek başına olmasına,

C, J ve O firmalarının yedi departmanda da yeteneğe sahip olmaması ve diğer firmalardan destek alabilecek niteliğe sahip olmasından dolayı bu firmaların kendi aralarında bir küme oluşturmasına,

Oluşturulan iki küme haricinde kalan diğer firmalar ise matrizen de görüleceği gibi farklı yetenek alanlarına göre hem destek alabilecek hem de destek verebilecek nitelikte olan firmalar olması sebebiyle bu firmaların hem kendi kümelerinde bulunan firmalara destek verip, destek alabilecekleri; hem de diğer kümelerde yer alan ve destek almak isteyen diğer firmalara destek verebilecekleri şekilde bir küme oluşturmasına gerek görülmiştir.

4. SONUÇ [CONCLUSION]

Günümüzde rekabet edebilmenin temel unsurlarından biri işletme kabilyetlerini ön plana çıkararak stratejik yön verme çalışmalarında bulunmaktadır. Bu şekilde şirketler rekabet edebilecekleri alanlara odaklanırken geliştirmek istedikleri alanlarda da dış kaynak kullanımına yönelmekte veya alternatif çözümler üretmektedir. İşletmelerin aynı zamanda bu üstün yönlerini birbirlerine kümelenme ve rekabet edebilme amaçları ile sunmaları da mümkündür.

İşletmelerin üstün yönlerini ve dış kaynak kullanımına olan ihtiyaçlarını belirlemek için firmaların kabilyetlerinin ortaya çıkarılmasına yönelik ilk olarak anket soruları oluşturulmuştur. Anketlerde yer alan sorular yedi bölüm başlığı altında gruplanmıştır. Sorulardan alınan cevaplarla firmaların kendi bünyelerinde buldukları ekipman, malzeme, teknoloji, strateji, analiz, personel, bilgi, beceri gibi üstün

yönleri ile dışarıdan temin ettikleri hizmet ve ürünler saptanmıştır.

Bu çalışmada oluşturulan yetenek kümelerinde yer alan firmaların birçok yetenek kümesinde bulunması, çapraz ve çoklu ilişkilerinin olması yedi kümenin de birbirleri ile ilişkili olduklarını göstermektedir.

Kümelerde yer alan firmalar ortak olması sebebiyle neredeyse bütün kümeler birbirleriyle kesişim halindedir. Bu nedenle yetenek kümelerinin tüm yeteneğe sahip olan, hiçbir yeteneğe sahip olmayan ve farklı departmanlarda yeteneğe sahip olan firmalar olarak en fazla üç küme ya da bütün firmalar aynı kümede olacak şekilde tek küme oluşturulabileceği sonucuna varılabileceği de düşünülerek ROC algoritmasında elde edilen sonuçla benzerlik gösterdiği görülmüştür.

Oluşturulan yedi adet kümeye bakıldığında Lojistik ve İmalat yetenekleri konusunda çok sayıda firmanın düşük puana sahip oldukları görülmektedir. Bunun sebebi olarak anket uygulanan firmaların Teknokent bünyesinde faaliyet gösteren bilişim ağırlıklı firmalar olması gösterilebilir.

Yazılım, Bakım-Onarım, Pazarlama-Satış ve Planlama ve Ar-Ge kümelerinde ise Lojistik ve İmalat Kümelerine kıyasla daha az sayıda düşük yetenek puanına sahip firma olduğu gözlenmiştir.

Yapılan çalışma ile yetenek puanlaması zayıf olan firmaların buldukları kümelerde ihtiyaç duydukları alanlarda destek alarak kendilerini geliştireceklerini ve ihtiyaçlarını karşılayacakları düşünülmektedir. İncelenen yetenek kümelerinden elde edilen veriler doğrultusunda firmaların birden fazla kümede bulunması sebebiyle departmanlar arası ilişkili oldukları sonucu ortaya çıkmıştır.

Çalışmanın sonucunda alışlagelmiş sektörel kümelenmenin dışında kabilyet odaklı kümelenmenin de oluşturulabileceği gösterilmiştir. Kabilyet odaklı küme oluşturulması ile farklı sektörlerdeki firmaların bir araya gelerek benzer yeteneklerde birbirlerine fayda sağlayabilecekleri de görülebilmektedir. Ayrıca firmaların kabilyetlerine dikkat çekilerek sahip olduğu yetenek ve ihtiyaç duyulan yeteneklerin farkındalığının sağlanması,



geliştirilmesi ve diğer firmalara destek verilmesi yönünde çalışmaların yapılabileceği, bunun da aynı veya birbirleri ile ilişkili kümelerde daha hızlı olabileceğini tekrar ifade etmek yerinde olacaktır.

TEŞEKKÜR [ACKNOWLEDGMENTS]

Bu çalışmada anket çalışmasındaki yardımlarından dolayı Sakarya Üniversitesi Teknokent personeline teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR [REFERENCES]

- [1] Amruthnath N., Gupta T., “Modified Rank Order Clustering Algorithm Approach by Including Manufacturing Data”, *Preprints of the 4th IFAC International Conference on Intelligent Control and Automation Sciences*, Reims, France, June 1-3, 2016.
- [2] Askin, R.G. “Contributions to the design and analysis of cellular manufacturing systems”, *International Journal of Production Research*, 51:23-24, 6778-6787, DOI: 10.1080/00207543.2013.825745, 2013.
- [3] Atmaca E., “Grup Teknolojisi Hücrelerinin Tasarımı ve Amaç Programlama Yaklaşımının Uygulanması”, *Süleyman Demirel Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Y., C.7, S.2, s.285-298, 2002.*
- [4] Cansız M.,” Türkiye’de Kümelenme Politikaları Ve Uygulamaları”, *Organize Sanayi Bölgeleri Üst Kurulu (OSBÜK) Yayınları*, Ankara, 2011.
- [5] Delgado M., Porter Michael E., Stern S., “Clusters, convergence, and economic performance”, *Research Policy* 43, 1785–1799, 2014.
- [6] Haykır Hobikoğlu E., Hacıoğlu Deniz M., , “Kümelenme Modeli ve Politikaları Çerçevesinde Bilgi Yapılanması ve Rekabet İlişkisi”, *International Conference on Eurasian Economies*, pp 232-237, 2011.
- [7] Jiang, D., Tang, C. & Zhang, A., “Cluster Analysis for Gene Expression Data: A Survey”, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 16, No 11, November, 2004.
- [8] King J.R., , “Machine-Component Grouping in Production Flow Analysis: An Approach Using a Rank Order Clustering Algorithms”, *Int.J.Prod. Res.*, Vol. 18, No:2, 213-232, 1980.
- [9] Kuşat N., “Kobi’ler İçin Kümelenmelerin Önemi Ve Turizm Sektörü İçin Kümelenmelerin Uygunluğunun Araştırılması”, *Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, 2/2 ,115-138, 2010.
- [10] Morosini P. “Industrial Clusters, Knowledge Integration and Performance”, *World Development* Vol. 32, No. 2, pp. 305–326, 2004.
- [11] OECD Report, “Business Clusters: Promoting Enterprise in Central and Eastern Europe”, 2005.
- [12] Porter Michael E. “Clusters and the New Economics of Competition” 1998. Available at: <http://www.csus.edu/indiv/c/chalmersk/econ251fa12/clustersneweconofcompetition.pdf>
- [13] Roberto Y., Edward A., Davis L., Kanu I., Lin Yang, “The Automotive Cluster in Portugal”, *HBS 1260 Microeconomics of Competitiveness, Project Paper*, May 4, 2007.
- [14] Tano Sofia, “Regional clustering of human capital: school grades and migration of university graduates”, *The Annals of Regional Science*, March, Volume 52, Issue 2, pp 561–581. ,2014.
- [15] Timurçin, D.,“Türkiye’de Kobi’lerin Rekabet Gücü ve Rekabet Üstünlüğü Sağlamada Kümelenmenin Etkisi”, *İstanbul Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Doktora Tezi*, 2010.
- [16] Tutar F., Tutar E., Eren M. F., “Bölgesel/Yerel Ekonomik Kalkınmanın Popülerleşen Yeni Aktörü: Kümelenme” *Akdeniz University Uluslararası Alanya İşletme Fakültesi Dergisi*, Cilt 3, Sayı 2, s.94-116, 2011
- [17] Türkiye için Kümelenme Politikasının Geliştirilmesi, Beyaz Kitap, <http://www.smenetworking.gov.tr/detay.cfm?MID=72> Erişim tarihi: Haziran 2015.
- [18] UKPGP, Ulusal Kümelenme Politikasının Geliştirilmesi Projesi Basın Bildiri Notu, http://www.bodto.org.tr/images/other/kumelenme_kapanis_etkinligi_basin_%20bilgi_%20notu.pdf Erişim tarihi: Haziran 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Gelis/Received</u> 29.08.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 29.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.336449	

Anti-kanser ilacı imatinib'in elektro-oksidasyon prosesi ile gideriminin yüzey yanıt metodu kullanılarak incelenmesi

Sibel Barisci*¹, Ozge Turkay², Anatoli Dimoglo³

ÖZ

Atıksularında bulunan farmasötikler sucul canlılar üzerinde oldukça toksik olmaları nedeniyle büyüyen bir endişe haline gelmektedir. Atıksularda ve yüzeysel sularda farmasötiklerin konsantrasyonları $\mu\text{g/L}$ ve ng/L gibi çok düşük seviyelerde olmasına rağmen bunların kronik etkileri nedeniyle ciddi ve acil bir araştırmaya gerek duyulmaktadır. Bu çevre ve sağlık problemlerine yol açan farmasötik mikrokirleticileri atıksulardan gidermek için klasik arıtma yöntemleri yetersiz olması sebebiyle ileri arıtma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle elektrokimyasal prosesler bu tür mikrokirleticileri arıtmak için oldukça başarılı yöntemler olarak dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, Imatinib (IMT) adlı etken maddenin elektro-oksidasyon yöntemi ile arıtılması çalışılmıştır. Imatinib etken maddesinin arıtılması için kimyasal-elektrokimyasal stabiliteye sahip Ti/RuO_2 elektrotu kullanılmıştır. Optimum çalışma şartlarının belirlenmesi amacıyla yüzey yanıt metodu (YYM) kullanılarak proses optimizasyonu yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Imatinib, yüzey yanıt, elektro-oksidasyon

Evaluation of anti-cancer drug imatinib removal by electro-oxidation process using response surface method

ABSTRACT

The pharmaceuticals which are found in the wastewater treatment effluents of the companies that produce cancer drug have become a serious fear for biotic living beings as they are toxic. Although the concentration of pharmaceuticals in surface water and wastewater are in low levels like $\mu\text{g/L}$ and ng/L levels, because of their chronical effects they are needed to be removed from water immediately. They are not amenable to conventional biological treatment due to their toxicity even at low concentrations. Therefore, powerful oxidation methods have to be researched to remove them from waters, thus avoiding their potential adverse health effects on humans and animals. Especially electrochemical processes to purify such micro pollutants have attracted attention as very successful methods. In this study, electro-oxidation of Imatinib (IMT) has been studied. Ti/RuO_2 electrode which has chemical and electrochemical stability has been used. In order

* Corresponding Author

¹ Temple University, sibel.barisci@temple.edu

² Gebze Teknik Üniversitesi, oturkay@gtu.edu.tr

³ Düzce Üniversitesi, anatolidimoglo@duzce.edu.tr

to determine their operation conditions, process optimization has been done by using Response Surface Method (RSM).

Keywords: Imatinib, response surface, electro-oxidation

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kanser, dünyadaki ölümlerin ikinci büyük sebebidir. Kanser vakalarının artmasıyla sitotoksik ilaçların tedavi amacıyla kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Sitotoksik ilaçlar insanlar tarafından kullanıldıktan sonra bir miktarı idrarda elimine edilerek atık su sistemlerine ulaşmaktadır [1]. Atık sularda ve yüzeysel sularda bulunan sitotoksik bileşikler çok düşük konsantrasyonlarda bulunurlar ve düşük konsantrasyonlarda bile canlıların DNA'sına müdahale ederek hücrelerin çoğalmasını bozabilmekte veya engelleyebilmektedir [2].

Hastane atık suları sitotoksik ilaçların ana bileşiklerini, metabolitlerini ve dönüşüm ürünlerini içerebilmektedir [3]. İnsanlara ve çevreye potansiyel toksisitesi sebebiyle atık su örneklerinde sitotoksik ilaçlar ve bu ilaçların metabolitlerinin analizlerinin yapıp, bu bileşiklere uygun arıtım yöntemlerinin geliştirilmesi gereklidir [1].

Günümüzde birçok farmasötik mikrokirleticinin biyolojik olarak zor ayrışabilir ya da ayrışamaz olduğu ve bu yüzden geleneksel arıtım yöntemleri ile giderilemediği bilinmektedir [4-5]. Kronik sağlık problemlerine neden olan sitotoksik bileşiklerin atık sulardan arıtılmasında klasik arıtma yöntemleri yetersiz olması sebebiyle ileri arıtma yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır [6]. Elektrokimyasal prosesler bu tür mikro kirleticileri arıtmak için oldukça başarılı yöntemler olarak dikkat çekmektedir [7-9]. Elektrokimyasal proseslerin kullanılmasıyla toksik ve kalıcı özellikteki organik maddeler zararsız son ürünlere dönüşebilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, anti-kanser ilacı olan Imatinib (IMT) etken maddesinin Ti/RuO₂ elektrotu kullanılarak elektro-oksidasyonu üzerine çalışmalar yürütülmüştür. Elektrooksidasyon deneylerinde, akım yoğunluğunun, başlangıç pH değerinin, ve elektrolit konsantrasyonunun giderim verimine etkisi araştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHODS)

2.1. Kullanılan Kimyasallar (Chemicals)

Imatinib (IMT) etken maddesinin standardı European Pharmacopoeia firmasından temin edilmiştir. Elektrooksidasyon deneyleri boyunca destekleyici elektrolit olarak Sigma Aldrich marka Na₂SO₄ kullanılmıştır. pH'ın giderim verimine etkisinin incelenmesi için yapılan deneylerde seyreltik (%20'lik) Sigma Aldrich marka H₂SO₄ ve (%20'lik) NaOH kullanılmıştır.

2.2. Deneysel Düzenek (Experimental Set-up)

Kesikli sistem elektro-oksidasyon deneyleri, 500µg/L başlangıç konsantrasyonunda hazırlanan IMT çözeltileri ile yürütülmüştür. Sentetik olarak hazırlanmış etken madde içeren solüsyon reaktöre doldurulduktan sonra elektrotlar, aradaki mesafe 0,5 cm olacak şekilde reaktöre yerleştirilmiş ve güç kaynağına bağlanmıştır.

Ti/RuO₂ elektrodu ile yapılan elektro-oksidasyon deneylerinde 7,5 cm uzunluğunda, 6,5 cm genişliğinde ve 11 cm yüksekliğinde pleksiglastan yapılmış 350 mL'lik bir reaktör kullanılmıştır. Bu reaktörde 2 adet anot, 2 adet paslanmaz çelik katot olmak üzere 4 adet monopolar paralel bağlı elektrot kullanılmıştır. Monopolar paralel bağlama şekli daha önce yapılan çalışmalarda daha yüksek verim sağladığı için seçilmiştir [10, 11]. Elektrot boyutları 5x5 cm'dir ve her bir elektrotun yüzey alanı (suda kalan kısım) 20 cm²'dir.

Reaktördeki atık su, karıştırma hızı 120 rpm olacak şekilde manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır. Deneylere başlamadan önce iletkenlik ölçülmüştür.

2.3. Analitik Metotlar (Analytical Methods)

Hazırlanan numunelerin pH ve iletkenlik parametreleri Hach-Lange marka multimetre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. IMT konsantrasyonlarının belirlenmesinde Thermo Scientific TSQ Access Max Ultimate 3000 markalı (Triple Quadrupole) LC/MS-MS (Likit kromatografi-tandem kütle spektrometre)

kullanılmıştır. Kromatografik şartlar Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Imatinib'in LC/MS-MS ölçümündeki kromatografik şartlar (Chromatographic conditions for LC/MS-MS analysis of Imatinib).

Mobil Faz:	% 50 Metanol, %50 Amonyum Format (5mM), %0,1 (v/v) formik asit
Akış:	0,3 mL/min
Fırın:	400 °C
Basınç:	180 bar
Enjeksiyon Hacmi:	30 µL
Analiz Süresi:	4 min

2.4. Matematiksel ve İstatistiksel Prosedürler (Mathematical and Statistical Procedures)

IMT'nin elektro-oksidasyonu için optimum çalışma şartlarının belirlenmesi için yanıt yüzey metodu (YYM) kullanılmıştır. Bu programın kullanılması ile ulaşılmak istenen sonuç; farklı işletme parametrelerinin elektro-oksidasyon üzerindeki etkisini görmek, bu parametrelerinin bireysel ve sinerjetik olarak etkilerinin incelenmesi ve en yüksek verimi elde etmek için uygun şartların belirlenmesidir. Buna göre, akım yoğunluğu, pH ve zamanın bağımsız değişken; etken madde gideriminin bağımlı değişken olarak kabul edildiği model analizi yürütülmüştür. Box-Behnken deney dizaynı, IMT'nin elektro-oksidasyon ile gideriminde, seçilen faktörlerin değerlendirilmesi için kullanılmıştır (A: akım yoğunluğu, B: pH ve C: zaman). Giderim verimleri eşitlik 1'de belirtilen ikinci derece polinom eşitliğine uyarlanmıştır:

$$R = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j \quad (1)$$

Burada, R tahmin edilen cevap, X_i and X_j bağımsız değişkenler, β_0 intersept, β_i lineer katsayı, β_{ii} kuadratik katsayı ve β_{ij} etkileşim katsayısını belirtmektedir.

Seçilen parametrelerin, IMT giderimi üzerindeki etkileri belirlemek amacıyla farklı seviyeler seçilmiştir. Bu seviyeler seçilirken önceki çalışmalarımızda elde edilen sonuçlar dikkate

alınmıştır [12, 13]. Parametre seviyelerinin seçimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. İşletme parametreleri seviyeleri (Operating parameters' levels).

pH		I _a (mA/cm ²)		t (dk)	
Düşük (-1)	Yüksek (+1)	Düşük (-1)	Yüksek (+1)	Düşük (-1)	Yüksek (+1)
4	9	15	45	10	30

Design expert, versiyon 8.0.4.1 (STAT-EASE Inc., Minneapolis, USA) deneysel parametrelerin dizaynı ve elde edilen verilerin istatistiksel analizi için kullanılmıştır. Varyans analizi (ANOVA) istatistiksel parametrelerin tahmini için kullanılmıştır. Tablo 3'te deneylerde kullanılan dizayn parametreleri ve bu şartlara göre elde edilen giderim verimleri görülmektedir.

Tablo 3. IMT elektro-oksidasyonu için deney dizaynı ve elde edilen giderim verimleri (Experimental design for electro-oxidation of IMT and obtained removal efficiencies).

Faktör 1	Faktör 2	Faktör 3	Cevap
A: Akım yoğunluğu (mA/cm ²)	B: pH	C: Zaman (dk)	MTX Giderim (C/C ₀)
15,00	6,50	1,00	0,795
45,00	6,50	30,00	0,000944
15,00	6,50	30,00	0,00148
30,00	9,00	1,00	0,505
45,00	6,50	1,00	0,927
30,00	6,50	15,50	0,0004047
15,00	4,00	15,50	0,00323
45,00	4,00	15,50	0,00252
30,00	4,00	1,00	1,0291
30,00	6,50	15,50	0,0004043
30,00	6,50	15,50	0,0004041
30,00	6,50	15,50	0,000403
30,00	9,00	30,00	0,000625
30,00	6,50	15,50	0,0004047
30,00	4,00	30,00	0,002141
15,00	9,00	15,50	0,095537
45,00	9,00	15,50	0,224809

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. ANOVA Analizi ve Model Tahmini (ANOVA Analysis and Model Prediction)

IMT etken maddesinin elektro-oksidasyonunda Ti/RuO₂ elektrodu ile yapılan deneylerin optimum çalışma şartlarının belirlenmesine yönelik YYM yürütülmüş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 4. IMT elektro-oksidasyonuna etki eden faktörlerin kuadratik modele uygunluğu ve ANOVA analizi (Suitability of factors affected IMT electro-oxidation for quadratic model and ANOVA analysis).

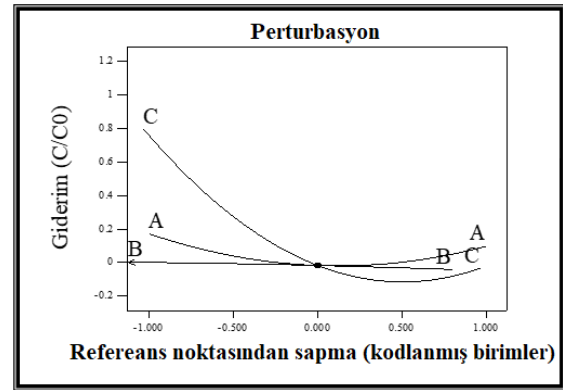
Kaynak	Kareler Toplamı	F Değeri	p-değeri
Model	2,28	9,84	0,0107 (etkili)
A-Akım yoğunluğu	3,180E-3	012	0,7398
B-pH	5,574E-3	0,22	0,6616
C-Zaman	1,56	60,42	< 0,0006
AB	0,033	1,28	0,3089
AC	5,600E-3	0,22	0,6609
BC	0,068	2,64	0,1653
A ²	0,085	3,28	0,1299
B ²	1,643E-4	6,367E-3	0,9395
C ²	0,55	21,24	0,0058
Uygunluk Eksikliği	0,13		
Salt Hata	0,000		
Toplam Varyasyon	2,41		

YYM dizaynı çerçevesinde yürütülen elektro-oksidasyonu deneyleri sonunda elde edilen ANOVA analiz sonuçları Tablo 4'teki gibidir. Kurulan modelin F değeri 9,84 ve Prob > F" değeri 0,0500'den küçük olduğu için model anlamlıdır. IMT giderme verimine etki edebileceği düşünülen akım yoğunluğu, zaman ve pH parametrelerinden ise sadece C, yani zamanın etkili olduğu elde edilmiştir. Regresyon analizi sonucu elde edilen kuadratik denklem aşağıdaki gibidir;

$$\text{Giderim (C/C}_0\text{)} = +1,510\text{E-}3 - 0,020\text{A} - 0,026\text{B} - 0,44\text{C} - 0,091\text{AB} + 0,037\text{AC} + 0,13\text{BC} + 0,15\text{A}^2 - 6,670\text{E-}3\text{B}^2 + 0,39\text{C}^2 \quad (2)$$

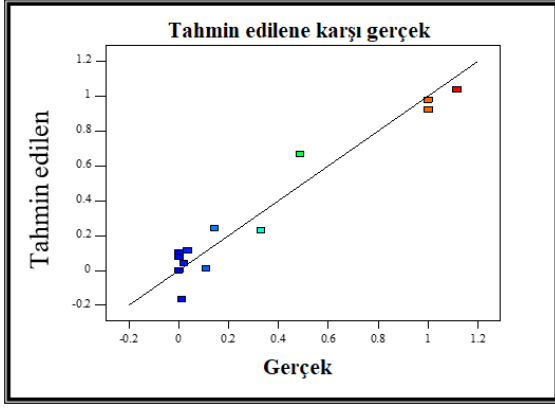
3.2. Grafiksel Analizler (Graphical Analysis)

Şekil 1'de verilen pertürbasyon eğrisi incelendiğinde, B parametresinin hiçbir etkisi olmadığı görülmektedir. Yani, başlangıç IMT konsantrasyonu pH'sının 4, 7 ve 9'a ayarlanması ile yürütülen deneyler sonucunda pH değişiminin IMT giderim verimine seçilen yöntem açısından etkisi olmadığı belirlenmiştir. Diğer yandan, A parametresi yani, akım yoğunluğu alt ve üst limit değerleri yakınında giderime etki etse de genel olarak verim üzerinde bir etkisi yoktur. Bu sebeple, alt değere yakın akım uygulamaları elektro-oksidasyon için yeterlidir. Zaman değişimi, IMT giderme verimi üzerinde en etkili parametredir. Alt limitten, üst limite doğru gidildikçe belirgin bir verim artışı gözlenirse de, yaklaşık 25. dk'dan sonra zaman artışının olumsuz etkisi görülmüştür.



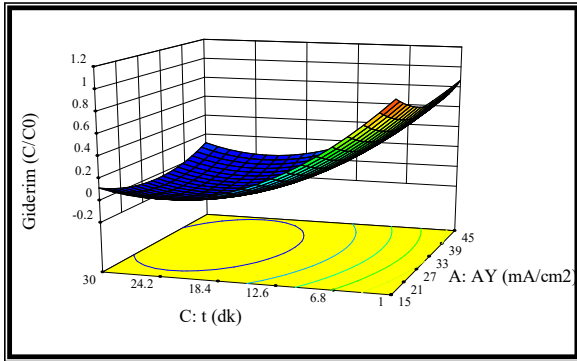
Şekil 1. Seçilen faktörlerin minimum değerden maksimum değere olan değişimi (Pertürbasyon Eğrisi) (A: Akım Yoğunluğu=30, B:pH=7, C: Zaman=16) (The change of selected factors from minimum value to maximum value) (Perturbation plot) (A: Current Density=30, B: pH=7, C: Time=16).

Deneysel dizayn sonucunda elde edilen IMT giderme verimleri, YYM programı tarafından tahmin edilen değerlerle oldukça örtüşmektedir ve regresyon katsayısı (R²) 0.9466'dır (Şekil 2).



Şekil 2. Deneysel ve tahmin edilen koşulların karşılaştırılması (The comparison of experimental and predicted conditions).

Şekil 3'te görüldüğü gibi 1 ve 15. dakikalar arasındaki kontür çizgileri paralel ve seyrek. Buradan hareketle, akım yoğunluğu ve zamanın bütünleşik etkisinin bulunmadığı görülmektedir. Diğer yandan, 15 dakikadan sonrasında da bütünleşik etki bulunmamasına rağmen, akım yoğunluğunun orta değerlerinde IMT giderim verimi yükselmiştir. Düşük ve yüksek akımlarda benzer giderim verimlerinin elde edilmesine dayanarak, 15 mA/cm² 'lik akım yoğunluğunun 30 dakikalık reaksiyon sonunda yüksek giderim verimi elde etmek için yeterli olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Zaman ve akım yoğunluğuna bağlı olarak IMT'ın giderim grafiği (Deneysel koşullar: [IMT]₀=0,5 mg/L; pH=7) (A: Akım Yoğunluğu; C: Zaman) (The removal of IMT according to time and current density) (Experimental conditions: [IMT]₀=0,5 mg/L; pH=7) (A: Current Density; C: Time).

Deney sonuçları incelendiğinde, IMT konsantrasyonunun 500 µg/L'den 30 dakika sonunda %99,96 giderim verimiyle 0,2 µg/L'ye indiği görülmüştür. Anot olarak Ti/RuO₂ elektrodunun kullanıldığı elektrooksidasyon prosesi ile IMT giderimi için optimum şartlar 15 mA/cm² akım yoğunluğu, başlangıç pH değeri 7 ve 30 dakika proses süresi olarak belirlenmiştir.

Akım yoğunlu bütün elektrokimyasal proseslerde önemli bir parametredir. Akım yoğunluğu anodun çözünmesi, hidroksil radikali oluşumu ve elektrot yüzeyinde elektron transferini etkilemektedir [14, 15]. Literatür çalışmalarında, genellikle akım yoğunluğu artışının belli bir noktaya kadar verimi arttırdığı, fakat daha fazla artışın çok fazla etkisinin olmadığı görülmüştür [16, 17]. Bu çalışmada da akım yoğunluğunun 15 mA/cm²'den 30 mA/cm²'ye çıkarılması giderim verimini arttırmış fakat akım yoğunluğunun 45 mA/cm²'ye yükseltilmesinin giderim verimi üzerinde fazla bir etkisinin bulunmadığı görülmüştür. Örneğin yapılan bir başka çalışmada farklı akım yoğunluklarındaki (1,43; 4,29; 7,14 ve 14,29 mA/cm²) fenol indirgenme hızı incelenmiştir. 60 dakika içindeki giderim yüzdeleri sırasıyla, %60,4; %75,5; %93,9 ve %95,6 elde edilmiştir [18].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kanser tedavisinde önemli yeri olan sitotoksik onkoloji ilaçları, kimyasal özelliklerinden dolayı hem insana hem de çevreye oldukça zararlı bileşiklerdir. Sahip oldukları toksikolojik, teratojenik ve endokrin bozucu etkileri ile hem sağlıklı hücrelere de zarar vermektedir. Atık sularda ve yüzeysel sulardaki konsantrasyonları çok düşük seviyelerde olmasına rağmen zayıf biyolojik bozunurlukları ve kronik etkileri nedeniyle bu ilaçların atık sudaki varlığı ve akıbeti ciddi bir şekilde araştırılması gereken bir konudur. Bu çalışmada, anti-kanser ilacı olan Imatinib (IMT)'in yüksek stabiliteye sahip Ti/RuO₂ elektrodu kullanılarak elektro-oksidasyonu incelenmiştir. Yüzey yanıt metodu (YYM) kullanılarak, akım yoğunluğu, pH ve zaman gibi elektro-oksidasyon prosesine etki eden önemli işletme parametrelerinin ve optimum çalışma değerlerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Yürütülen çalışmalar sonucunda IMT giderimi için anlamlı model (F değeri ve p<0,005) elde edilmiştir. Model değerlerinin bireysel etkisi olarak reaksiyon süresinin IMT gideriminde anlamlı ve en etkili olduğu tespit edilmiştir. pH değişiminin IMT giderimi üzerinde herhangi bir etkisi olmamıştır. Bununla beraber, akım yoğunluğu ve zamanın bütünleşik etkisinin bulunmadığı görülmektedir. Diğer yandan, 15 dakikadan sonrasında da bütünleşik etki bulunmamasına rağmen, akım yoğunluğunun orta değerlerinde IMT giderim verimi yükselmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından, 114Y606 numaralı proje ile desteklenmiştir.

REFERANSLAR (REFERENCES)

- [1] S. Nussbaumer, P. Bonnabry, J. L. Veuthey, S. Felury-Souverain, "Analysis of anticancer drugs: a review," *Talanta*, vol. 85, pp. 2265–2289, 2011.
- [2] Santana-Viera, S. Montesdeoca-Esponda, Z. Sosa-Ferrera, J. J. Santana-Rodríguez, "Cytostatic drugs in environmental samples: An update on the extraction and determination procedures," *Trends in Analytical Chemistry*, vol. 80, pp. 373–386, 2016.
- [3] M. Isodori, M. Lavorgna, C. Russo, M. Kundi, B. Zegura, M. Novak, M. Filipic, M. Misik, S. Knasmueller, M. L. de Alda, D. Barcelo, B. Zonja, M. Cesen, J. Sacnar, T. Kosjek, "Chemical and toxicological characterisation of anticancer drugs in hospital and municipal wastewaters from Slovenia and Spain," *Environmental Pollution*, vol. 219, pp. 275–287, 2016.S.
- [4] S. Mompelat, B. LeBot, O. Thomas, "Occurrence and fate of pharmaceutical products and by-products, from resource to drinking water," *Environment International*, vol. 35, pp. 803–814, 2009.
- [5] R. Andreozzi, V. Caprio, C. Ciniglia, M. de Champdoré, R. Lo Giudice, R. Marotta, E. Zuccato, "Antibiotics in the environment: occurrence in Italian STPs, fate, and preliminary assessment on algal toxicity of amoxicillin," *Environmental Science and Technology*, vol. 38, pp. 6832–6838, 2004.
- [6] B. Du, A. E. Price, W. C. Scott, L. A. Kristofco, A. J. Ramirez, C. K. Chambliss, J. C. Yelderian, B. W. Brooks, "Comparison of contaminants of emerging concern removal, discharge, and water quality hazards among centralized and on-site wastewater treatment system effluents receiving common wastewater influent," *Science of the Total Environment*, vol. 85, pp. 976–984, 2014.
- [7] F. Sopaj, M. A. Rodrigo, N. Oturan, F. I. Podvorica, J. Pinson, M. A. Oturan, "Influence of the anode materials on the electrochemical oxidation efficiency. Application to oxidative degradation of the pharmaceutical amoxicillin," *Chemical Engineering Journal*, vol. 262, pp. 286–294, 2015.
- [8] J. Wu, H. Zhang, N. Oturan, Y. Wang, L. Chen, M. A. Oturan, "Application of response surface methodology to the removal of the antibiotic tetracycline by electrochemical process using carbon-felt cathode and DSA (Ti/RuO₂-IrO₂) anode," *Chemosphere*, vol. 87, pp. 614–620, 2012.
- [9] E. Guinea, C. Arias, P. L. Cabot, J. A. Garrido, F. Centellas, E. Brillas, "Mineralization of salicylic acid in acidic aqueous medium by electrochemical advanced oxidation processes using platinum and boron-doped diamond as anode and cathodically generated hydrogen peroxide," *Water Research*, vol. 42, pp. 499–511, 2008.
- [10] Y. Demirci, L. C. Pekel, M. Alpbaz, "Investigation of Different Electrode Connections in Electrocoagulation of Textile Wastewater Treatment," *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 10, pp. 2685–2693, 2015.
- [11] N. Daneshvar, H. A. Sorkhabi, M. B. Kasiri, "Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 112, pp. 55–62, 2004.
- [12] S. Barışçı, O. Turkay, E. Ulusoy, M. G. Seker, E. Yuksel, A. Dimoglo, "Electro-oxidation of cytostatic drugs: Experimental and theoretical identification of by-products and evaluation of ecotoxicological effects," *Chemical Engineering Journal*, vol. 334, pp. 1820–1827, 2018.
- [13] S. Barışçı, O. Turkay, E. Ulusoy, M. G. Seker, G. Soydemir, A. Dimoglo, "Electrochemical treatment of anti-cancer drug carboplatin on mixed-metal oxides and boron doped diamond electrodes: Density functional theory modelling and toxicity evaluation," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 344, pp. 316–321, 2018.

- [14] H. Barndok, D. Hermosilla, L. Cortijo, E. Torres, Á. Blanco, "Electrooxidation of industrial wastewater containing 1, 4-dioxane in the presence of different salts," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 21, pp. 316-321, 2014.
- [15] S. Cotillas, J. Llanos, P. Canizares, D. Clematis, G. Cerisola, M. A. Rodrigo, M. Panizza, "Removal of Procion Red MX-5B dye from wastewater by conductive-diamond electrochemical oxidation," *Electrochimica Acta*, vol. 263, pp. 1-7, 2018.
- [16] S. Barı cı, O. Turkay, E. Ulusoy, M. G. Seker, G. Soydemir, A. Dimoglo "Electrochemical treatment of anti-cancer drug carboplatin on mixed-metal oxides and boron doped diamond electrodes: Density functional theory modelling and toxicity evaluation," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 344, pp. 316-321, 2018.
- [17] H. L. Elhadi, Z. Frontistis, H. Ait-Amar, S. Amrani, D. Mantzavinos, "Electrochemical Oxidation of Pesticide Thiamethoxam on Boron Doped Diamond Anode: Role of Operating Parameters and Matrix Effect," *Process Safety and Environmental Protection*, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.03.021>, 2018.
- [18] N. Flores, I. Sires, R. M. Rodrigez, F. Centellas, P. L. Cabot, J. A. Garrido, E. Brillas, "Removal of 4-hydroxyphenylacetic acid from aqueous medium by electrochemical oxidation with a BDD anode: Mineralization, kinetics and oxidation products," *Journal of electroanalytical Chemistry*, vol. 793, pp. 58-65, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 05.09.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 29.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.336784	

Deniz dibi tarama malzemesinin faydalı kullanımı için yıkama-eleme tesisi tasarımı ve yıkama-eleme prosesi atıksuyunun yönetimi

Hatice Merve Başar^{*1}, Barış Güzel, Pembe Özer-Erdoğan, Selda Murat-Hocaoğlu, Doğan Özel, Şeyla Ergenekon, Leyla Tolun

ÖZ

Deniz dibi tarama faaliyetlerinden kaynaklanan dip tarama malzemelerinin (DTM) yönetimi küresel bir sorundur. Ülkemizde DTM'ler genellikle dökü gemileriyle açık denize boşaltılmakta ve sucul ortam için ciddi bir risk teşkil etmektedir. Bu çalışmada, dip tarama faaliyetleri neticesinde ortaya çıkan DTM'lerin ve yıkama atıksularının karakterizasyonu belirlenmiş ve DTM'nin beton uygulamalarında ince agrega olarak faydalı kullanımı için bir yıkama-eleme tesisi tasarımı yapılmıştır. Ayrıca, kurulması planlanan yıkama-eleme tesisinin pilot bölgeler için maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile DTM'nin yıkama-eleme ön işlemine tabi tutulması durumunda yüksek klorür, sülfat ve su içeriğinin giderilerek ince agrega olarak beton çalışmalarında kullanılabileceği, oluşan yıkama-eleme atıksuyunun kanalizasyona/denize deşarjına risk oluşturacak herhangi bir kirletici içermediği belirlenmiştir. Olası 1.500 m³/gün kapasiteli bir DTM yıkama-eleme tesisinin ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin sırasıyla 6.753.600 TL ve 2.366.810 TL ve birim maliyetinin ise 6,3 TL/ton olacağı tahmin edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Deniz Dibi Tarama Malzemesi, Faydalı Kullanım, Yıkama-Eleme Tesisi, Atıksu Karakterizasyonu, Atıksu Yönetimi

Washing-sieving plant design for the beneficial use of marine dredged material and management of wastewater from washing-sieving process

ABSTRACT

The management of dredging materials (DM), which is generated from marine dredging activities is a global problem. DMs in our country are usually dumped at sea by barges and pose a serious risk to the aquatic environment. In this study, the characterization of the DMs excavated by dredging operations and the characterization of their washing wastewaters are determined and the design of a washing-sieving plant for the beneficial use of DM as a fine aggregate in concrete applications is carried out. Furthermore the cost analysis of the washing-sieving plant planned to be established for pilot regions is performed. The findings of this study indicate that DM can be used as a fine aggregate in concrete applications in case of subjecting to the washing-sieving pre-treatment process, generated washing-sieving wastewater does not involve any contaminant causing a risk to the sewage/sea discharge. The first investment and operating costs of possible DM washing-sieving plant's having a capacity of 1,500 m³/day are predicted to be 6,753,600 TL and 2,366,810 TL, respectively, and the unit cost is presumed as 6.3 TL/ton.

Keywords: Marine Dredged Material, Beneficial Use, Washing-Sieving Plant, Wastewater Characterization, Wastewater Management

¹ Beykent Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Sarıyer, 34398, İstanbul, Türkiye hmervebasar@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Deniz dibi tarama faaliyeti, limanlarda, marinalarda ve su kanallarında zaman içinde akıntı ile biriken malzemenin alınması suretiyle derinliğin artırılması ve iyileştirilmesi, remediasyon, rekreasyon ve taşkın yönetimi için yapılmaktadır [1-3]. Gerçekleştirilen tarama faaliyetleri sonucu yüksek miktarlarda tarama malzemesi ortaya çıkmaktadır. Fransa'da yılda 50 milyon m³ [4,5], ABD'de 400 milyon m³, Hollanda'da 40 milyon m³ [6], Almanya'da 40-50 milyon m³ [7], Japonya'da 25-30 milyon m³ [8] ve ülkemizde ise yılda yaklaşık 3 milyon m³ dip tarama malzemesi (DTM) çıkarıldığı tahmin edilmektedir. Çevresel yönetimi küresel bir problem [9] olan DTM'nin yönetiminde denize boşaltım, bertaraf ve faydalı kullanım olmak üzere üç alternatif mevcuttur [10]. Ülkemizde DTM'ler genellikle dökü gemileriyle açık denize boşaltılmakta iken, gelişmiş bazı ülkelerde tehlikeli özellik gösteren DTM'lerin bertaraf edildiği, tehlikesiz özelliğe sahip olanların ise ham madde olarak kullanıldığı görülmektedir. Denize boşaltım; sucül ortam için ciddi bir risk teşkil etmekle birlikte [10] bertaraf seçeneği hem maliyetli oluşu, hem de geniş alanlar gerektirmesi nedeniyle tercih edilememektedir [11,13]. Bu nedenle, DTM'nin ham madde olarak çeşitli uygulama alanlarında faydalı kullanımının değerlendirilmesi kaçınılmaz hale gelmiştir. DTM'nin ham madde olarak değerlendirmesinde üç temel faydalı kullanım alternatifi [14] sunulmaktadır: (a) mühendislik kullanımları, diğer bir deyişle, arazi iyileştirme, arazi ıslahı, kumsal besleme, kıyı koruma, günlük ara örtü ve kaplama malzemesi; (b) sulak alan oluşturmayı da içeren çevresel iyileştirme ve (c) tarımsal/ürün kullanımları, örneğin, iyileştirilmiş yüzey toprağı, inşaat dolgu malzemeleri, tuğla, seramik, hafif agrega ve karayolu alt taban malzemesi [3,15-27].

DTM'ler inorganik karakterde malzemeler olup tarama faaliyetleri neticesinde karaya çıkarılmaları halinde atık olarak değerlendirilmekte ve atık mevzuatına tabi olmaktadırlar. 02.04.2015 tarihli ve R.G. 29314 sayılı Atık Yönetimi Yönetmeliği (AYY)'ne göre DTM; 17 05 05* (tehlikeli maddeler içeren dip tarama çamuru) ve 17 05 06 (17 05 05 dışındaki dip tarama çamuru) atık kodları ile tanımlanmaktadır [28]. AYY madde 19'da bir atığın "yan ürün" olarak kullanılabilmesi için sağlanması gereken kriterler yer almakta olup

bu kapsamda DTM'lerin de "yan ürün" olarak kullanımı mümkün olabilmektedir. DTM'nin faydalı kullanımının teknik, çevresel ve ekonomik açıdan uygunluğunun tespit edilmesi halinde beton, peyzaj, karayolu uygulamaları gibi faydalı kullanım seçeneklerinde "yan ürün" olarak değerlendirilebilmesi mümkündür; ancak, DTM'nin öncelikle ön işleme tabi tutularak yüksek klorür ve sülfat içeriğinin azaltılması ve ince fraksiyonun (<63 µm) uzaklaştırılması gerekmektedir.

Ön işlem alternatifleri arasında en ekonomik görünen fiziksel ayırma/kum yıkama; DTM partiküllerinin elek sistemi ve hidrosiklon yardımıyla büyüklük, yoğunluk ve yüzey kimyalarındaki farklılıklara göre ayrılması, bu sayede olası kirleticilerin yoğun oldukları ince fraksiyonla birlikte kumlu malzemedeki uzaklaştırılmasıdır [29]. Temiz olduğu düşünülen iri taneli/granül malzemenin inşaat/yol dolgusu, düzenli depolama sahalarında ara örtü, çimento, beton ham maddesi gibi pek çok faydalı kullanım seçeneği mevcuttur [9, 30-32], ince fraksiyon (silt-kil) mekanik susuzlaştırma/pompalama ile düzenli depolama tesislerine gönderilmekte, yıkama suyu ise metal/organik gideriminden sonra tekrar kullanım için sisteme geri beslenmekte veya alıcı ortama deşarj edilmektedir [29,33].

Günümüzde, DTM yıkama-eleme tesisleri gerek Avrupa'da gerekse Amerika'da çok sayıda mevcuttur. Florida'da Miami nehrinde 2004-2008 yıllarında remediasyon amaçlı çıkartılan 500.000 m³ DTM, limanda mobil olarak kurulan 150 ton/saat kapasiteli ve tam ölçekli yıkama-eleme tesisinde elek sistemleri ve hidrosiklon ile fraksiyonlarına ayrılıp susuzlaştırılarak düzenli depolama sahasında ara/üst örtü olarak değerlendirilmiştir [34,35]. Almanya'da Hamburg ve Bremen limanlarından taranan DTM, Hamburg'daki ön işlem tesisinde tane boyutuna göre sınıflandırılıp susuzlaştırılarak 5 milyon tuğla/yıl kapasiteli Hanseaten-Stein Ziegelei (HZG) GmbH tuğla tesisine gönderilmektedir [7]. İngiltere ve Galler'in açık denizlerinden yıllık 20-25 milyon ton deniz agregası rıhtımlarda konumlanan ön işlem tesislerinde ıslah edilerek yapı endüstrisinin yaklaşık %20 oranında kum ve çakıl ihtiyacını karşılamaktadır [36].

01.10.2013-01.10.2016 tarihleri arasında "(111G036) Deniz Dip Tarama Uygulamaları ve Tarama Malzemesinin Çevresel Yönetimi (DİPTAR)" isimli 3-yıllık ulusal araştırma projesi yürütülmüş, proje ile DTM'lerin yönetim

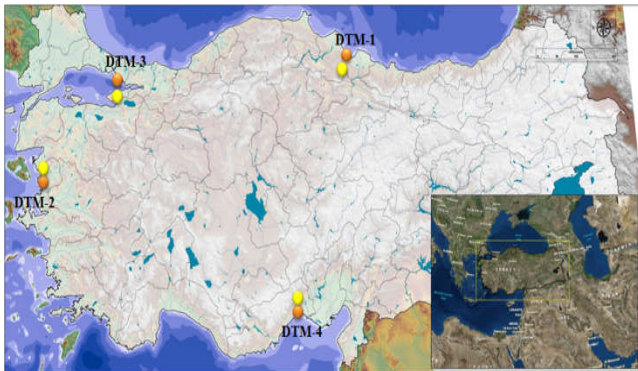
seçenekleri olan denize boşaltım, bertaraf ve faydalı kullanım kapsamında ülkemizde ilk kez entegre ve çevresel sürdürülebilir bir yaklaşım geliştirilmiştir [37]. Söz konusu projenin çıktıları da kullanılarak Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından hazırlanan “Taslak Deniz Dibi Taraması ve Dip Tarama Malzemesinin Çevresel Yönetimi Yönetmeliği” hazırlanmış, yönetmeliğin 2018 yılı 2. yarısında yürürlüğe girmesi ile DTM yönetimindeki mevzuat ihtiyacının giderilmesi planlanmaktadır.

Bu çalışmada, DTM'lerin beton uygulamalarında silika kumu yerine ikame edilmek sureti ile ince agrega olarak faydalı kullanımı için karada kalıcı DTM yıkama-eleme tesisinin ülkemiz için ilk kez tasarlanması, bu tesise ait ilk yatırım ve işletme maliyetlerinin genel olarak ortaya konulması ve laboratuvar ölçekli DTM yıkama-eleme çalışmaları ile ortaya çıkan atıksuyun karakterizasyonunun ve yönetiminin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

DİPTAR Projesi [37] kapsamında Türkiye genelinde dört denizi de içerecek şekilde toplam 15 Pilot Bölge bulunmasına karşın, bu çalışma özelinde DTM yıkama-eleme tesislerinin kurulabilme olasılığı olan 4 Pilot Bölge ele alınmıştır. Pilot bölgeler, tarama faaliyetlerinin yoğun olduğu limanlar, bu limanlara konum olarak yakın ileri/ikincil arttırma içeren AAT'ler göz önünde bulundurularak farklı limanlardan dökü gemisi ile DTM'nin taşınabileceği merkezi bir konumda seçilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan dört farklı DTM numunesinin alındığı Pilot Bölgeler Şekil 1'de, bu bölgelere ilişkin detay bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Pilot bölgeler (Pilot regions)

Tablo 1. Pilot bölgelere ilişkin bilgiler (Information relating to pilot regions)

Örnek No	Pilot Bölge	Deniz Adı	Koordinatlar
DTM-1	Samsun Yakakent Balıkçı Barınağı	Karadeniz	41° 38' 22" N 35° 30' 23" E
DTM-2	İzmir PETKİM Konteyner Limanı	Ege Denizi	38° 46' 43" N 26° 55' 44" E
DTM-3	Kocaeli TÜPRAŞ Yarımca Limanı	Marmara Denizi	40° 45' 18" N 29° 45' 22" E
DTM-4	Mersin Uluslararası Limanı	Akdeniz	36° 48' 12" N 34° 38' 40" E

2.1.1. DTM'lerin Fiziko-kimyasal ve Toksikolojik Özelliklerinin Belirlenmesi (Determination of the Physico-chemical and Toxicological Properties of DMs)

DTM numunelerinin ilk olarak renk, koku, nem/katı madde içeriği (%ağ.), pH, iletkenlik (mS/cm), özgül ağırlık (g/cm³) gibi fiziksel özellikleri ve tane boyutu dağılımları (%ağ.) belirlenmiştir. Daha sonra DTM'lerin sırası ile organik/inorganik madde içerikleri (%ağ.), Toplam S (%), Toplam N ve Toplam P (mg/kg), Yağ-gres (mg/kg), Suda çözünen Cl⁻ (%ağ.) ve asitte çözünen SO₄⁻² (%ağ.), Dioksin/Furan (ng/kg I-TEQ), Poliaromatik Hidrokarbon (mg/kg), Toplam Pestisit (mg/kg), Tributyl kalay (mg/kg) ve ağır metal içerikleri (mg/kg) gibi kimyasal içerikleri saptanmıştır. Son olarak, DTM'lerin toksikolojik özellikleri ekotoksiste ve akut toksiste (balıklarda ve farelerde) kapsamında incelenmiştir. İlgili fiziko-kimyasal ve toksikolojik analizlere ilişkin yöntemler Tablo 2'de belirtilmiştir.

2.1.2. DTM Yıkama-Eleme Prosesi Atıksularının Karakterizasyonu (Characterization of DMs Washing-Sieving Procedure's Wastewater)

31.12.2004 tarihli ve R.G.25687 sayılı Su Kirliliği Kontrolü Yönetmeliği (SKKY)'nde, olası DTM yıkama-eleme tesisi atıksuyunun deşarj kriterlerine ilişkin sektör tablosu olmadığından laboratuvar ölçekli DTM yıkama-eleme işlemi sonucu ortaya çıkan atıksuların karakterizasyonu için parametre seçiminde SKKY'de yer alan kum yıkama tesisi kriterleri (SKKY-Tablo 7.5), derin

deniz deşarjı kriterleri (SKKY-Tablo 22) ve deniz suyunun genel kalite kriterleri (SKKY-Tablo 4) dikkate alınmıştır. Ayrıca, ham DTM'nin karakterizasyon sonuçları da göz önünde bulundurulmuştur. Seçilen parametreler; pH, iletkenlik, Klorür, Sülfat, Askıda Katı Madde (AKM), Toplam Organik Karbon (TOK), Besin Elementleri (Toplam Kjeldahl Azotu (TKN) ve Toplam Fosfor (TP)) ve Ağır Metaller (Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn, As, Ag) olmuştur. Laboratuvar ölçekli DTM yıkama-eleme atıksularının pH ve iletkenlik değerleri WTW Inolab multimetre ile ölçülmüştür. Klorür ve Sülfat konsantrasyonları Dionex ICS-1000 İyon Kromatografi cihazı, ağır metal konsantrasyonları ise Perkin-Elmer 8300 DV İndüktif Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektroskopi (ICP-OES) cihazı ile saptanmıştır. Atıksu örneklerinin AKM, TKN, TP ve TOK içerikleri Standard Metodlara [38] göre belirlenmiştir.

2.1.3. DTM'nin Taranması, Karaya Çıkartılması ve DTM Yıkama-Eleme Tesisine Transferi İçin Kabuller (Assumptions for the Dredging, Unloading and Transfer of DM to the DM Washing-Sieving Plant)

DTM'nin yıkama-eleme tesisinde işleme tabii tutulması öncesi uygulanması gereken adımlar için çeşitli kabuller yapılmıştır. Buna göre; ticari limanda/marinada kepçeli tarak gemisi ile günde 1.500 m³ DTM (özellik ağırlık ~2.500 kg/m³) taranacağı varsayılmıştır. Taranan DTM, 250 ve/veya 500 m³lük dökü gemisi ile kıyıya yanaştırıldıktan sonra, limandaki vinç vasıtasıyla karaya çıkartılarak, limanda inşa edilen 2.000 m³ hacimli su sızdırma/çöktürme havuzuna (25 m x 40 m x 2 m) alınmalıdır. DTM taranması, karaya çıkartılması ve ilgili DTM yıkama-eleme tesisine taşınması için gerekli maliyetlerin, taramayı yaptıran liman işletmesine ait olması öngörülmüştür. Su sızdırma/çöktürme havuzunda geçirimsiz tabaka, drenaj tabakası ve drenaj boruları ile birlikte vakum sisteminin bulunması, havuzdaki DTM yığınının katı madde miktarının vakum sistemi ile 3-4 saat içerisinde yaklaşık %65'ten %90'a çıkarılması ve bu sayede tuzlu su yükünün DTM yıkama-eleme tesisine girişinin önlenmesi düşünülmüştür. Su sızdırma/çöktürme havuzundan ekskavatörle alınan DTM'nin, kamyonlarla yıkama-eleme tesisindeki besleme bunkerine taşınması öngörülmüştür (Şekil 2).

2.1.4. Maliyet Analizi Kabulleri (Cost Analysis Assumptions)

İlk yatırım maliyetlerine ilişkin olarak, 1.500 m³ kapasiteli DTM yıkama-eleme tesisinin özel sektör kurum/kuruluş tarafından kendi öz kaynakları ile kurulacağı düşünülmüş, taranan DTM'nin katı madde miktarı % 65 olarak kabul edilmiştir. DTM yıkama-eleme prosesi sonucu 200 ton/saat net yıkanmış kuru ürün (5mm-63µm) (528.000 ton/yıl yıkanmış ürün) elde edileceği öngörülmüştür. Tesisten çıkacak kaliteli çakıl (+5 mm) bu tonaja dahil edilmemiştir. Kentsel AAT çıkış suyunun DTM yıkama-eleme tesisine bedelsiz verilmesi ve boru hattı ile tesise pompalanması planlanmıştır.

DTM yıkama-eleme tesisindeki besleme bunkerleri, konveyör bantlar, titreşimli elekler, karıştırıcı, hidrosiklon sistem, tikener ve filtrepress için 5 yılda bir, ilgili ekipmanın ilk yatırım maliyetinin %10'u oranında yenileme maliyeti öngörülmüştür. Proses suyunun tesise transferinde kullanılacak su pompasının ise 5 yılda bir tamamen yenileneceği düşünülmüştür.

İşletme maliyeti hesabı için ekonomik analiz ise 15 yıl süre ile yapılmıştır. DTM yıkama-eleme tesisinin gelir ve giderleri hesaplanırken sabit fiyatlar kabul edilmiş ve enflasyon hesaba katılmamıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. DTM'lerin Fiziko-kimyasal ve Toksikolojik Özellikleri (Physico-chemical and Toxicological Properties of DMs)

DTM'lerin fiziko-kimyasal ve toksikolojik özellikleri 02.04.2015 tarihli, R.G.29314 sayılı "Atık Yönetimi Yönetmeliği-EK3B: Tehlikeli atık eşik konsantrasyonları"na göre değerlendirilmiş, elde edilen analiz sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Analiz sonuçları incelendiğinde; DTM'lerin nötrale yakın ve/veya (hafif) bazik ve genellikle düşük-orta su içerikli oldukları; pH ve nem içerikleri itibarı ile düzenli depolama tesislerinde depolanmalarının mümkün olacağı; içerdikleri tuzluluk sebebiyle iletkenlik değerlerinin yüksek olması (1,85-3,76 mS/cm) kabul edilebilir seviyelerdedir. Elektriksel iletkenlik, numunedeki tuzluluk seviyesinin belirlenmesi amacıyla yapılmakta olup DTM'lerin özellikle toprak uygulamaları öncesinde (tuz mevcudiyetinin bitki

Tablo 2. DTM'lerin fiziko-kimyasal ve toksikolojik özellikleri (Physico-chemical and toxicological properties of DMs)

Parametreler	DTM-1	DTM-2	DTM-3	DTM-4	Yöntem		
Fiziksel Özellikler							
Renk	Füme	Kahverengi	Füme	Füme	Görsel		
Koku	Hafif kokulu				Duyusal		
Nem (%ağ.)	29,53	24,00	23,92	29,14	TS 9546 EN 12880		
Katı Madde (%ağ.)	70,47	76,00	76,08	70,86	TS 9546 EN 12880		
pH (sulu çöz.)	8,77	8,92	7,90	9,11	TS 8753 EN 12176		
İletkenlik (mS/cm) (sulu çöz.)	1,86	3,76	1,85	2,86	SM-2510 B		
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,24	2,47	2,46	2,34	TS EN 1097-6:2002		
Kimyasal Özellikler							
Organik madde (%ağ.)	2,46	5,01	<0,01	<0,01	TS 8336		
İnorganik madde (%ağ.)	68,01	70,99	76,08	70,84	TS 8336		
Toplam S (%)	0,13	0,19	0,28	0,26	ASTM D4239		
Toplam N (mg/kg)	400,4	80,1	226,8	146,6	SM-4500 N		
Toplam P (mg/kg)	469,6	1.347,1	710,2	419,4	SM-4500 P		
Yağ-Gres (mg/kg)	405	<180	<180	<180	SM-5220B		
Suda çözünen Cl ⁻ (%ağ.)	0,32	0,39	0,26	0,34	TS EN 1744-1:2013		
Asitte çözünen SO ₄ ²⁻ (%ağ.)	0,26	0,33	0,24	0,30			
Dioksin/Furan (ng/kg I-TEQ)	0,029	0,029	0,635	0,313	EPA 1613		
P.Arom. Hd.karbon (mg/kg)	0,347	0,732	0,776	0,009	ISO 11338-2		
Toplam Pestisit (mg/kg)	<0,005				EPA 8081 ve 8141		
Tributikalay (mg/kg)	<0,009				İşletme içi yöntem		
Toksikolojik Özellikler							
Ekotoksosite	Deniz bakterisi <i>vibrio fischeri</i> üzerinde ekotoksik değil.				ISO/EN/DIN 11348		
Akut toksisite (balık)	Balıklar için akut risk yok.				92/69/EEC- C.1.		
Akut toksisite (fare)	Kategori 5 veya tanımlanmamış (LD ₅₀ > 5000 mg/kg)				OECD TG 423		
Tane boyutu dağılımı (%ağ.)							
Çakıl (>2mm)	0,53	40,36	38,40	31,88	Yaş eleme		
Kaba kum (2mm-200µm)	13,04	36,86	36,56	28,27			
İnce kum (200µm-63µm)	61,23	10,13	10,25	27,37			
Silt-kil (<63µm-2µm)	25,20	12,65	14,79	12,48			
Ağır metallere	Risk kodları	DTM-1	DTM-2	DTM-3	DTM-4	Risk koduna göre AYY EK3B Tehlikeli atık eşik kons.(min.)	Yöntem
Pb	R: 33, 61, 62, 26/27/28, 20/22, 50/53	%0,0011 11 mg/kg	%0,0013 13 mg/kg	%0,0008 8 mg/kg	%0,0032 32 mg/kg	% 0,1	ISO 11885 EPA 7473
Cd	R: 26, 45, 62, 63, 68, 50/53, 48/23/25	<%0,00001 <0,1 mg/kg	<%0,00004 0,4 mg/kg	%0,00001 0,1 mg/kg	%0,00004 0,4 mg/kg	% 0,1	
Cr	R: 11, 40, 52	%0,0047 47 mg/kg	%0,0140 140 mg/kg	%0,0017 17 mg/kg	%0,599 599 mg/kg	% 1	
Cu	R: 11, 52, 36/37/38	%0,0024 24 mg/kg	%0,0023 23 mg/kg	%0,0012 12 mg/kg	%0,0038 38 mg/kg	% 20	
Ni	R: 40, 43, 48/23, R52/53	%0,003 30 mg/kg	%0,0132 132 mg/kg	%0,0009 9 mg/kg	%0,0251 251 mg/kg	% 1	
Zn	R: 15, 17, 50/53	%0,0051 51 mg/kg	%0,0128 128 mg/kg	%0,00793 79,3 mg/kg	%0,00105 105 mg/kg	% 0,25	
Hg	R: 26, 61, 48/23, 50/53	%0,000005 0,05 mg/kg	%0,0002 2,00 mg/kg	%0,00013 1,30 mg/kg	<%0,000003 0,03 mg/kg	% 0,1	
As	R: 23/25, 50/53	%0,0017 17 mg/kg	%0,035 350 mg/kg	%0,00086 9 mg/kg	%0,00084 8 mg/kg	% 0,25	

gelişimine engel olması sebebiyle) tuz giderim işleminin yapılması gereklidir [18].

Risk oluşturabilecek kayda değer bir uçucu organik içeriğe ve organik içerikte kayda değer fonksiyonel gruplara sahip olmadıkları saptanmış, bu sebeple organik içerik açısından tehlikesiz oldukları sonucuna varılmıştır. DTM'lerdeki organik içerik miktarının genellikle 0-12% arasında değişiklik göstermesi beklenen bir sonuçtur [39].

İnorganik madde içerikleri AYY-EK 3B'de verilen sınır değer olan %20'nin altında bulunmuş; ayrıca, örneklerde tespit edilen ağır metal seviyelerinin risk oluşturabilecek seviyelerden çok aşağıda oldukları saptanmıştır. Bu sebeple inorganik içerik açısından tehlikesiz oldukları belirlenmiştir. Ekotoksikolojik değerlendirmesinde denizel ortam bakterisi vibrio fischeri üzerine ekotoksik etki göstermedikleri (Sınıf 0) belirlenmiştir. Test balıkları üzerinde yapılan akut toksisite testlerinde herhangi bir risk (balık biyodeneji, ZSF=1) tespit edilememiştir. Test fareleri üzerinde yapılan akut toksisite testlerinde herhangi bir risk tespit edilmemiştir. Ancak, olası kronik etkiler bu çalışma kapsamında ele alınmamıştır. İnorganik içerikli olmaları sebebiyle kalorifik değerleri çok düşük olduğundan yakma ile bertaraf açısından uygun olmadıkları değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, AYY-EK3B analiz sonuçlarına göre; DTM'lerin "tehlikesiz atık" ve atık kodunun 17 05 06 (17 05 05 dışındaki dip tarama çamuru) olduğu belirlenmiştir [37].

3.2. Yıkanmış-Elenmiş DTM'lerin Temel Karakteristikleri (Basic Characteristics of Washed-Sieved DMs)

DTM'lerin betonda silika kumu yerine ince agrega olarak kullanımına yönelik laboratuvar ölçekli yıkama-eleme deneyleri sonucu elde edilen DTM temel parametreleri ile silika kumuna (şahit) ait analiz sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. Ham DTM'lere kıyasla; yıkanmış-elenmiş DTM'lerin (4mm-63µm) katı madde içeriklerinin arttığı, pH'larının düştüğü görülmektedir. Ayrıca, DTM'nin beton çalışmalarında ince agrega olarak kullanımına risk teşkil eden klorür, sülfat ve kil-silt içeriklerinin önemli oranda azaldığı ve "TS 706 EN 12620+A1:2009 Beton Agregaları" standardındaki limit değerlere uygun hale geldiği görülmektedir.

Analiz sonuçları Estes ve Palermo tarafından 2001 yılında yapılan çalışma [40] ile uyumludur. Öte

yandan; DTM'lerin yıkama-eleme sonrasında silt-kil ve klorür içeriklerinde ciddi bir azalma gözlenmiş olup, söz konusu sonuçların silika kumuna kıyasla daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bu bağlamda, yıkama-eleme işlemine tabi tutulan DTM'lerin betonda herhangi bir çevresel riske sebebiyet vermeden beton uygulamalarında ince agrega olarak faydalı kullanımı teknik olarak mümkün görülmektedir.

Tablo 3. Yıkama-eleme sonrası DTM temel parametreleri (Basic parameters of DMs after washing-sieving)

Parametre	Silika Kumuna (Şahit)	DTM-1	DTM-2	DTM-3	DTM-4	Yöntem
Katı Madde (%ağ.)	-	86,03	87,59	88,21	85,74	TS 9546 EN 12880
pH (sulu çöz.)	8,08	7,82	7,73	7,42	7,95	TS 8753 EN 12176
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,68	2,51	2,53	2,59	2,58	TS EN 1097-6:2002
Silt-kil (%ağ.)	18,85	9,81	3,84	5,68	5,92	Yaş eleme
Suda çözünen Cl ⁻ (%ağ.)	0,07	0,06	0,02	0,03	0,04	TS EN 1744-1:2013
Asitte çözünen SO ₄ ⁻² (%ağ.)	0,025	0,08	0,07	0,08	0,08	

3.3. DTM Yıkama-Eleme Atıksularının Karakterizasyonu ve Yönetimi (Characterization and Management of DM Washing-Sieving Wastewater)

DTM yıkama-eleme atıksularının karakterizasyon sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. DTM'ler yapılarındaki CaCO₃ kaynağı olarak da bilinen deniz kabukları mevcudiyetinden ötürü ve deniz suyunun doğal pH aralığının 7,5-8,5 olması sebebiyle (hafif) bazik (pH: 8,77-9,11) karakterdedirler. Dolayısıyla, DTM yıkama-eleme atıksularının pH değerlerinin de (hafif) bazik (pH: 8,21-8,68) değerinde tespit edilmesi olağandır. pH değerlerinin SKKY-Tablo 4'teki pH aralığı (pH: 6,00-9,00) ile de uyumlu olduğu gözlenmiştir. Yıkama atıksularında çözülmüş formdaki ağır metal konsantrasyonlarının ise, ölçüm limitlerinin altında olduğu tespit edilmiş olup, bu durum, atıksuyun alkali özelliğine göre beklenen bir sonuçtur. Ham DTM'lerdeki ağır metal içeriklerinin de düşük olması sebebiyle atıksu örneklerinde ağır metal açısından risk ön görülmemektedir. Atıksu karakterizasyon

Tablo 4. DTM yıkama-eleme işlemi atıksularının karakterizasyon sonuçları (Characterization results of DM washing-sieving procedure)

Parametreler	DTM-1	DTM-2	DTM-3	DTM-4	Yöntem
pH	8,21	8,34	8,35	8,68	
İletkenlik (µS/cm)	1960	2010	3740	5130	SM-4500-H+B
AKM (mg/L)	330	176	304	146	SM-2540
Cl ⁻ (mg/L)	461	463	1.006	1.400	
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	115	134	135	183	SM-4110B
TKN (mg/L)	1,64	0,74	1,29	0,55	SM-4500 N
TP (mg/L)	0,16	0,06	0,15	0,05	SM-4500 P
TOK (mg/L)	9,50	< 0,50	2,70	< 0,50	SM-5310B
Pb (mg/L)		< 0,01			
Cd (mg/L)		< 0,004			
Cr (mg/L)		< 0,006			EPA 6020A
Cu (mg/L)		< 0,02			ICP-OES
Ni (mg/L)		< 0,004			
Hg (mg/L)		< 0,00013			SM-3112
Zn (mg/L)		< 0,007			
As (mg/L)		< 0,014			EPA 6020A
Ag (mg/L)		< 0,004			ICP-OES

sonuçları incelendiğinde, en önemli parametrenin AKM olduğu, AKM içeriklerinin 146-330 mg/L arasında değiştiği ve DTM'lerdeki kil-silt fraksiyonu ile AKM değerleri arasında bağlantı bulunduğu saptanmıştır. Besin elementleri sonuçlarına göre; atıksulardaki TKN ve TP konsantrasyonları sırası ile; 0,55-1,64 mg/L ve 0,05-0,16 mg/L aralığında ölçülmüş; en yüksek TKN ve TP içeriklerine AKM'lerin de yüksek bulunduğu DTM-1 ve DTM-3 no.lu atıksu örneklerinde rastlanmıştır. Makronütrient (TKN, TP) konsantrasyonlarının aynı örneklerde yüksek olması, bu kirleticilerin de AKM yapısındaki organik içerikten kaynaklandığına işaret etmektedir. Bir başka ifadeyle, TKN ve TP'nin atıksuda büyük oranda partiküler formda olduğu ve AKM giderimi yapılarak giderilebileceği düşünülmüş; bu sebeple, DTM-3 örneği atıksuyunda Imhoff hunisi ile gravite çöktürme uygulanarak AKM giderimi denenmiştir. Beklendiği üzere, çöktürme süresi arttıkça AKM giderimi artmış, buna paralel olarak, nin arttığı, TKN-TP içerikleri de büyük oranda partiküler madde kaynaklı olması sebebiyle, azalarak ölçüm limitlerinin altına inmiştir.

DTM yıkama-eleme atıksuyunun denize deşarjında deniz suyu kalitesinin etkilenmemesi için SKKY-Tablo 4'teki AKM limit değerinin 30 mg/L olduğu düşünüldüğünde, yıkama

atıksularındaki kil-silt'in ve dolayısıyla AKM'nin ayrımı önem arz etmektedir. Bu sebeple, DTM yıkama-eleme tesisinden çıkacak atıksuların deşarj edilmeden önce en azından gravite çöktürme işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Çöktürme veriminin yeterli olmadığı durumlarda, çöktürme sonrasında uygun gözenek açıklığına sahip mikro elek kullanımı ve/veya koagulan ve flokülan madde kullanılarak kimyasal çöktürme yapılması göz önünde bulundurulabilir. Kimyasal çöktürmenin oluşacak çamur özelliklerini etkileyeceği unutulmamalı ve çöktürme sonrasında alt fazda oluşacak kil-silt içeren DTM'nin kullanılmasının planlandığı durumlarda, kimyasal madde seçiminde malzemenin kullanım amacı göz önünde bulundurulmalıdır. Bu durumda, mikro elek kullanımı tercih edilebilir ve/veya geri kazanılacak malzemenin kullanım amacını etkilemeyecek kimyasalların seçimi yapılabilir. Ayrıca, DTM yıkama-eleme işleminden çıkan atıksuların SKKY'ye göre kanalizasyona/denize deşarjı için Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'nın görüşüne başvurulmalıdır.

3.4. DTM Yıkama-Eleme Tesisi Tasarımı ve Çalışma Prensibi (Design and Working Principle of DM Washing-Sieving Plant)

DTM yıkama-eleme tesisinin tasarımında, gerek yurt içindeki kum yıkama-eleme tesislerinin, gerekse yurt dışındaki DTM yıkama-eleme tesislerinin tasarımları göz önünde bulundurulmuştur. DTM yıkama-eleme tesisinin ileri/ikincil arıtma sistemine sahip kentsel atıksu arıtma tesisi (kentsel AAT) arazisine sabit bir tesis olarak kurulması; yıkama-eleme işleminde proses suyu olarak, ilgili kentsel AAT çıkış suyunun kullanılması ve bu sayede su tüketim maliyetlerinin azaltılması düşünülmüştür. Ancak, kentsel AAT çıkış suyunun kum filtrasyon ve UV dezenfeksiyon işlemlerinden geçirilmesi ve proses suyu olarak kullanımı öncesi Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'ndan görüş alınması gereklidir. Kum filtrasyon ve UV dezenfeksiyon işlemlerinin uygulanma sebebi, kentsel AAT çıkış suyunun içindeki çözünmeyen, çeşitli büyüklüklerdeki partiküllerin ve AKM'nin giderimi ve mikroorganizmaların etkisiz hale getirilmesidir [41,42].

Tasarımı yapılan DTM yıkama-eleme tesisinin çalışma prensibi, tesiste yer alması planlanan üniteler ve her bir ünitenin tercih edilme nedenleri, DTM'nin malzeme özellikleri ve kullanım amacı

ile ilişkilendirilerek aşağıda detayları ile belirtilmiştir.

Taramanın yapıldığı limandan kamyonlarla yıkama-eleme tesisindeki besleme bunkerine taşınan DTM, besleme bunkerinden konveyör bantlarla iki katlı kaba elek sistemine gelerek, içeriğindeki çöp ve kaba malzemelerden (+100 mm ve 50-100 mm) yıkama (nozzle)-eleme yöntemiyle arındırılmalıdır. DTM daha sonra blademill adı verilen karıştırıcıda su ilavesi ile iyice karıştırılarak yapısındaki topraklar dağıtılmalıdır. Karıştırıcıdan (blademill) çıkan DTM, üç katlı yıkamalı titreşimli elek sisteminden geçirilerek 5 mm üzeri malzeme, betonda kaba agrega olarak kullanım ihtiyacına göre üç farklı fraksiyona (+22 mm, 12-22 mm, 5-12 mm) ayrılmalıdır. Üç katlı elek sisteminden çıkan 5 mm altı sulu DTM, yapısında bulunan ve betonda ince agrega olarak kullanım için uygun olmayan 63 µm altı malzemedan ayrılması amacıyla, 250 ton/saat kapasiteli hidrosiklon sistemine alınarak [43] merkezkaç ve çekme kuvvetlerinin etkisiyle yoğunluk farkına göre iki alt sınıfa ayrılmalıdır. Buna göre; hidrosiklon alt çıkışından kumlu malzeme (5 mm-63 µm) (hedef ürün) alınmalı ve susuzlandırma eleğinden geçirilerek susuzlaştırılmalıdır. Hidrosiklon üst çıkışından alınan sulu kil-silt karışımı (<63 µm) ise, önce 180 m³'lük karıştırıcılı sekizgen ara tanka, oradan da çöktürme havuzuna (tikener) alınarak kimyasal polimer dozajı uygulanmalı, kil-silt fraksiyonu gravitasyonel yolla çöktürülerek [44] tikener alt çıkışından 200 ton/saat kapasiteli filtre-prese verilerek susuzlaştırılmalıdır [45]. Tikener üst fazından alınan atıksuyun yüksek tuz içeriğine sahip olması ve tuz gideriminin yüksek maliyeti sebebiyle atıksu geri kazanımı yapılmaması öngörülmüştür. Proses atıksuyunun mikro elek/kum filtresinden geçirilerek denize/kanalizasyona deşarj edilmesi düşünülmüştür. Söz konusu DTM yıkama-eleme tesisinin tasarımındaki kritik parametrelerden ilki, DTM'nin tane boyu dağılımıdır. Böyle bir DTM yıkama-eleme tesisinin ancak maksimum %40 kil-silt içeriğine sahip bir tarama malzemesinin ön işleminden geçirilmesinde verimli olacağı öngörülmüştür.

DİPTAR Projesi [37] kapsamında Türkiye genelinde DTM yıkama-eleme tesislerinin kurulabileceği alanlar dört deniz özelinde önerilmiştir. Bu alanlar seçilirken ülke çapında tarama faaliyetlerinin yoğun olduğu limanlar ve bu limanlara konum olarak yakın ileri/ikincil arıtma

içeren AAT'ler ön planda tutulmuştur. DTM yıkama-eleme tesisinin gerek limana gerekse ileri/ikincil arıtma içeren AAT'ye yakın bir konumda inşa edilmesi, tasarımdaki ikinci kritik parametredir. Olası DTM yıkama-eleme tesisinin merkezi konumu, DTM'nin denize boşaltım yerine dökü gemisi ile bu tesislere taşınmasına olanak sağlayacaktır.

Tasarımı yapılan DTM yıkama-eleme tesisi Şekil 2'de verilmiştir. 2016 yılında Kim ve çalışma arkadaşları [43], Shingal gölünden alınan ham tarama sedimanının ayırma işlemi için benzer bir şematik tasarım yapmışlardır.

Küçük ölçekli tarama faaliyetlerinden çıkan DTM'lerin ön işlemleri için ise denizde mobil DTM yıkama-eleme tesisleri ayrıca değerlendirilmelidir. Tablo 5'te çalışmaya konu olan dört pilot bölgedeki tarama senaryolarına göre DTM'nin taşınacağı olası yıkama-eleme tesisleri ve proses suyunun temin edileceği AAT'ler kapasiteleri ile birlikte verilmiştir.

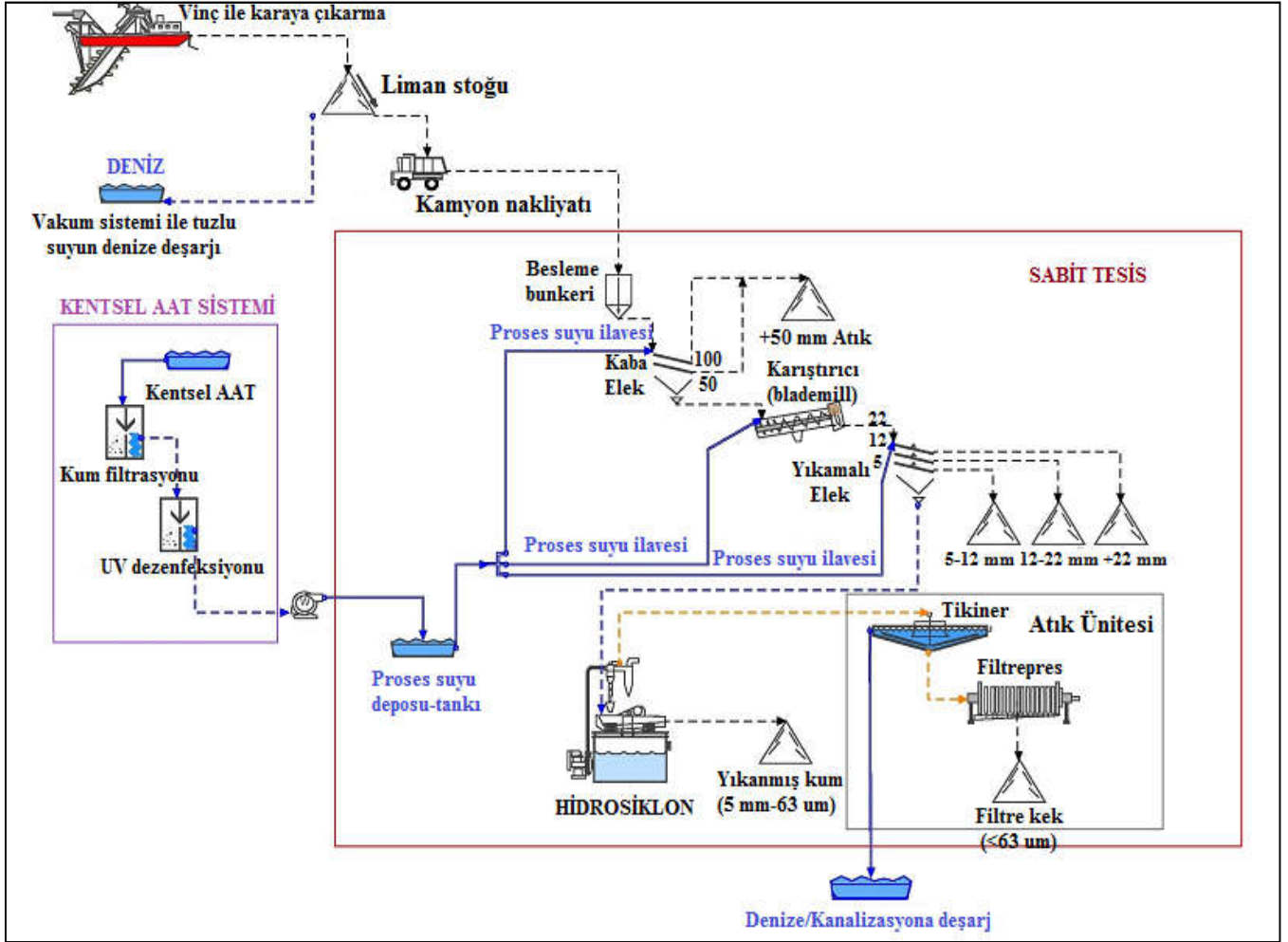
3.5. DTM Yıkama-Eleme Tesisi Maliyetleri (DM Washing-Sieving Plant Costs)

3.5.1. DTM Yıkama-Eleme Tesisi Maliyet Analizi Genel Değerlendirme (General Assessment of DM Washing-Sieving Plant Cost Analysis)

Maliyet analizi, alternatif yatırım projelerinin karşılaştırılmasında kullanılan bir analiz yöntemi olup, gerek özel teşebbüs, gerekse kamu kuruluşlarınca, yatırım projelerinde seçme ve sıralama yapmak için kullanılmaktadır. Bu analizde, yatırımın ekonomik ömrü süresince beklenen net gelirler (yıllık gelirlerle giderlerin farkı), belirli bir iskonto oranı ile yatırımın başlangıç dönemindeki değerine (bugünkü değer) indirgenmekte ve bu değer, yapılan yatırım harcaması ile karşılaştırılmaktadır. Net Bugünkü Değer (NBD) (1) no.lu eşitlik ile hesaplanmakta olup Y_0 ; ilk yatırım maliyetini, NF ; net faydayı (yıllık gelir-gider farkı), i ; iskonto oranını ve n ; yılı ifade etmektedir. İskonto oranı %10 kabul edilmiştir.

$$NBD = -Y_0 + \sum_{n=1}^n \frac{NF_n}{(1+i)^n} \quad (1)$$

Dinamik birim maliyet yönteminde, öncelikle her alternatifin tüm fayda ve maliyetleri dikkate alınarak net bugünkü değer hesaplanmaktadır. Bu değer, o alternatifle yıllar içerisinde işlenecek DTM miktarının net bugünkü değerine bölünmekte, en düşük birim maliyetli alternative



Şekil 2. DTM Yıkama-Eleme tesisi tasarımı (Design of DM washing-sieving plant)

Tablo 5. DTM yıkama-eleme tesisi - Kentsel AAT eşleştirilmesi (öneri) (Matching of DM washing-sieving plant - Urban wastewater treatment plant (proposal))

Numune Kodu	Pilot Bölge Adı	Tahmini DTM (m ³)	DTM Yıkama-Eleme Tesisi Alanı	AAT Mevcudiyeti	AAT Kademesi/ Teknolojisi	AAT Ort. Kapst. (m ³ /gün)
DTM-1	Samsun Limanı	400.000	Samsun Limanı	-Ondokuz Mayıs AAT	-İkincil/klasik aktif çamur	10.000
DTM-2	İzmir PETKİM Limanı	100.000	İzmir Çiğli	-Çiğli AAT	-Uzun hava. aktif çamur	-
DTM-3	Kocaeli TÜPRAŞ Yarımca Limanı	100.000	Yalova Altınova	-Altınova Tavşanlı Kaytazdere AAT	-İkincil arıtım klasik aktif çamur	12.200
DTM-4	Mersin Uluslararası Limanı	2.000.000	Mersin Limanı	-Atakent AAT -Erdemli AAT -İskenderun AAT	-Klasik aktif çamur -Uzun hava. aktif çamur -Klasik aktif çamur	8.000 20.000 57.000

seçilmektedir. (2) no.lu eşitlikte DBM; dinamik birim maliyeti, DTM; tarama malzemesini (m³), i; iskonto oranını, n; yılı ifade etmektedir.

$$DBM = \frac{NBD}{\sum_{n=1}^n \frac{DTM_n}{(1+i)^n}} \quad (2)$$

İlk yatırım maliyetinin bileşenleri olarak sırası ile; tesisin kurulacağı arazi, tesis zemin betonu, su sızdırma/çöktürme havuzu, tesis giriş suyunun arıtımı (kum filtrasyon ve UV dezenfeksiyon), tesis çıkış suyunun arıtımı (mikro elek ve kum filtresi), besleme bunkerı ve konveyör bantlarla tesis kurulumu, titreşimli kaba elek sistemi,

karıştırıcı, titreşimli ince elek sistemi, hidrosiklon sistemi, ara tank, tikener, filtre-pres, su pompası, idari bina, kantar, dozer, kamyon, yükleyici maliyetleri ve öngörülemeyen giderler dikkate alınmalıdır.

İşletme maliyetinin bileşenleri olarak ise sırası ile; personel, elektrik, su, polimer, yakıt giderleri, bakım-onarım maliyetleri, rıtma tesisleri işletme giderleri ve genel idari giderler dikkate alınmalıdır.

3.5.2. Pilot Bölgeler için Maliyet Analizi (Cost Analysis for Pilot Regions)

1.500 m³/gün kapasiteli DTM yıkama-eleme tesisi için ilk yatırım maliyeti Tablo 6'da, işletme maliyeti ise Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 6. DTM yıkama-eleme tesisi ilk yatırım maliyeti (DM washing-sieving plant investment cost)

Faaliyet	İlk Yatırım Maliyet Bileşeni	Maliyet (TL)
Yapım İşleri	Tesisin kurulacağı arazi (50 m x 60 m)	bedelsiz tahsis
	Tesis zemin betonu (900 m ³ C25/30 betonu)	234.000
	Su sızdırma/çöktürme havuzu (25 m x 40 m x 2 m) (geçirimsiz tabaka, drenaj boruları, drenaj tabakası, C25/30 sınıfı beton dahil)	100.000
	Tesis giriş suyunun arıtımı (kum filtrasyon ve UV dezenfeksiyon)	600.000
	Tesis çıkış suyunun arıtımı (mikro elek ve kum filtresi)	750.000
Makine-Ekipman	Besleme bunker ve konveyör bantlarla tesis kurulumu	500.000
	Titreşimli kaba elek sistemi	160.000
	Karıştırıcı (blademill)	240.000
	Titreşimli ince elek sistemi	160.000
	Hidrosiklon sistemi	1.100.000
	Ara tank, tikener, filtre-pres	1.400.000
	Su pompası	6.000
	İdari Bina	50.000
	Kantar	100.000
	Dozer	160.000
	Kamyon (3 adet) (25 ton kapasiteli)	450.000
	Loader (yükleyici)	160.000
	Öngörülemeden Giderler (Toplam mekanik ekipman ilk yatırım bedelinin %10'u)	583.600
	TOPLAM	6.753.600

Tablo 7. DTM yıkama-eleme tesisi işletme maliyeti (DM washing-sieving plant operating cost)

İşletme Maliyet Bileşeni	Maliyet (TL) (Yıllık)
Personel (10 kişi) (10 saat/gün)	600.000
Elektrik gideri (1,6 kW/ton ürün (5mm-63µm)) (Elektrik birim fiyat: 0,2 TL/kW)	211.200
Su (750 ton/saat)	Bedelsiz
Polimer (100 gr/1 ton ürün) (10 TL/kg)	528.000
Yakıt (0,2 L/ton ürün)	462.000
Bakım - Onarım (toplam mekanik ekipman ilk yatırım bedelinin yıllık %2,5'u kabulü)	145.900
Arıtma tesisleri işletme giderleri	225.000
Genel İdari Giderler (Tüm işletme giderlerinin %10'u kabulü)	194.710
TOPLAM	2.366.810

Buna göre; yıkanmış nihai ürünün satış fiyatı 15 TL+KDV olarak belirlenmiştir. DTM yıkama-eleme tesisinin yıllık geliri 528.000 ton ürünün satılması durumunda 7.920.000 TL, bu bedelden yıllık işletme gideri düşüldüğünde tesisin yıllık net geliri 5.553.190 TL olacaktır. Geri ödeme süresi; bir projenin net nakit girişlerinin, toplam ilk yatırım tutarını tamamen geri ödemesi için gerekli süre olup, tesis yatırımı için bu süre, tesisin sürekli faaliyette olması durumunda 2 senedir. Gelirin net bugünkü değeri 54.763.772 TL iken, harcamaların net bugünkü değeri 22.915.223 TL olarak hesaplanmıştır. Ürünün net bugünkü değeri de

3.650.918 ton olduğundan, DTM'nin yıkanması-elenmesi için birim maliyet (NBD harcama/NBD ürün) 6,3 TL/ton olarak öngörülmektedir.

Bu çalışmada yer alan DTM yıkama-eleme tesisi tasarım verilerine ilişkin fiyatlandırmalar günümüz koşullarını içermekte olup, söz konusu verilerin, gelecek yıllarda yapılacak çalışmalarda sadece yol gösterici olarak kullanılması hususu önem arz etmektedir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir: DTM'lerin Atık Yönetimi Yönetmeliği-EK3B'ye göre "tehlikesiz atık (17 05 06)" olduğu belirlenmiştir. DTM'lerin göreceli yüksek silt-kil fraksiyonu, klorür, sülfat ve su içeriklerinin, betonda silika kumu yerine ince agrega olarak kullanımlarına engel teşkil etmesi sebebiyle ön işleme tabi tutulmaları gerekir. Laboratuvar ölçekli DTM yıkama-eleme atıksularının AKM giderimi sağlandığı takdirde kanalizasyona/denize deşarjında risk teşkil edecek bir kirletici içermediği saptamıştır; ancak, deşarj izni alınması gereklidir. Endüstriyel ölçekli DTM yıkama-eleme atıksularında AKM giderimi için uygun gözenek açıklığına sahip mikro elek kullanımı ve/veya polimer dozajı ile kimyasal çöktürme düşünülebilir. Gerek yurt içindeki kum yıkama-eleme tesisleri, gerekse yurt dışındaki DTM yıkama-eleme tesisleri göz önünde bulundurularak 1.500 m³/gün DTM işleme kapasiteli yıkama-eleme tesisinin kurulabileceği, yer seçiminde ise kentsel AAT AAT'lere yakınlık göz önünde bulundurularak, AAT çıkış suyunun yıkamada kullanılması ve bu sayede su tüketim maliyetlerinin azaltılması mümkün görünmektedir. Bunun için, kullanımdan önce AAT çıkış suyunun kum filtrasyon ve UV dezenfeksiyon işlemlerinden geçirilmesi gerekmektedir. DTM yıkama-eleme tesisinin ilk yatırım ve işletme maliyetleri sırasıyla 6.753.600 TL ve 2.366.810 TL ve birim maliyet ise 6,3 TL/ton olarak tahmin edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma 111G036 no.lu TÜBİTAK KAMAG projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olup başta müşteri kurum Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı ve TÜBİTAK MAM olmak üzere proje ekibi çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] R. N. Bray, "Environmental Aspects of Dredging," IADC/CEDA and Taylor & Francis Publishers, London, United Kingdom, 2008
- [2] R. Zentar, D. Wang, N. E. Abriak, M. Benzerzour, W. Chen, "Utilization of siliceous-aluminous fly ash and cement for solidification of marine sediments," *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 856–863, 2012.
- [3] H. Cho, J. Shim, J. Park, "Performance evaluation of solidification/ stabilization of dredged sediment using alkali-activated slag," *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, pp. 10159–10168, 2016.
- [4] C. Alzieu, "Dredging and Marine Environment, State of the Art," Ifremer, Plouzané, France, 1999.
- [5] R. Boutin, "Improvement of Knowledge about the Outputs of Dredging Products as Mud in Sea: Phenomena Short Term-Close Field," Lyon, France, 1999.
- [6] J. Vermeulen, S. G. Van Dijk, J. T. C. Grotenhuis, W. H. Rulkens, "Quantification of physical properties of dredged sediments during physical ripening," *Geoderma*, vol. 129, pp. 147–166, 2005.
- [7] A. Netzband, A. L. Hakstege, K. Hamer, "Treatment and Confined Disposal of Dredged Material – Part 2: Dutch-German Exchange on Dredged Material," Germany, 2002.
- [8] L.A. Murray, "Dredged material as a resource," *Terra et Aqua*, vol. 112, pp.3-10, 2008.
- [9] V. Dubois, N. E Abriak, R. Zentar, G. Ballivy, "The use of marine sediments as a pavement base material," *Waste Management*, vol. 29, pp. 774–782, 2009.
- [10] OSPAR Commission, "JAMP Assessment of the Environmental Impact of Dumping of Wastes at Sea," Oslo-Paris Commission, Biodiversity Series, London, United Kingdom, pp. 433, 2009.
- [11] LIFE, "Methods for Management and Re-use of Polluted Sediments," European Project Realized by in vivo, France, 2002 (in French).
- [12] P. Grégoire, "Conceptual Model for Help with Multi-criterion Decision-taking in the Framework of the Negotiated Choice for a Marine Dredging Scenario," France, pp. 281, 2004 (in French).
- [13] F. Agostini, F. Skoczylas, Z. Lafhaj, "About a possible valorisation in cementitious materials of polluted sediments after treatment," *Cement and Concrete Composites*, vol. 29, pp. 270–278, 2007.
- [14] J. Lukens, "An Analysis of State, Territory & Commonwealth Policies Related to Dredging & Dredged Material Management," Vol. I/II, OCRM/ CPD Coastal Management Program Policy Series, Technical Document 00–02, 2000.
- [15] P. R. Krause, K. A. McDonnell, "The Beneficial Reuse of Dredged Material for Upland Disposal," California, USA, 2000.
- [16] J. P. Ulbricht, "Contaminated Sediments: Raw Materials for Bricks," *Symposium Dragage*, 2002.
- [17] Port of Baltimore, "Up for Grabs-innovative Solutions Are Being Found for Dredged Material," The Port of Baltimore Magazine, Maryland, 2009.
- [18] C. Sheehan, J. R. Harrington, J. D. Murphy, "A technical assessment of topsoil production from dredged material," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54 pp. 1377–1385, 2010.
- [19] D. J. Yozzo, P. Wilber, R. J. Will, "Beneficial use of dredged material for habitat creation, enhancement, and restoration in New York- New Jersey Harbor," *Journal of Environmental Management*, vol. 73 pp. 39–52, 2004.
- [20] K. Reine, D. Clarke, C. Dickerson, "Fishery resource utilization of a restored estuarine borrow pit: a beneficial use of dredged material case study," *Marine Pollution Bulletin*, vol. 73, pp. 115–128, 2013.
- [21] J. Limeira, M. Etxeberria, L. Agulló, D. Molina, "Mechanical and durability properties of concrete made with dredged

- marine sand,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 4165–4174, 2011.
- [22] I. Said, A. Missaoui, Z. Lafhaj, “Reuse of Tunisian marine sediments in paving blocks: factory scale experiment,” *Journal of Cleaner, Production*, vol. 102 pp. 66–77, 2015.
- [23] V. Cappuyns, V. Deweirt, S. Rousseau, “Dredged sediments as a resource for brick production: possibilities and barriers from a consumers’ perspective,” *Waste Management*, vol. 38, pp. 372–380, 2015.
- [24] Y. T. Kim and B. Pradhan, “Mechanical and germination characteristics of stabilized organic soils,” *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 0, pp. 1-8, 2015.
- [25] J. Park, Y. Son, S. Noh, T. Bong, “The suitability evaluation of dredged soil from reservoirs as embankment material,” *Journal of Environmental Management*, vol. 183, pp. 443-452, 2016.
- [26] S. Lirer, B. Liguori, I. Capasso, A. Flora, D. Caputo, “Mechanical and chemical properties of composite materials made of dredged sediments in a fly-ash based geopolymer,” *Journal of Environmental Management*, vol. 191, pp. 1-7, 2017.
- [27] V. Mymrin, J. C. Stella, C. B. Scremim, R. C. Y. Pan, F. G. Sanches, K. Alekseev, D. E. Pedroso, A. Molinetti, O. M. Fortini, “Utilization of sediments dredged from marine ports as a principal component of composite material,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 4041-4049, 2017.
- [28] AYY, “Atık Yönetimi Yönetmeliği,” Resmi Gazete No.: 29314, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2015.
- [29] D. E. Averett and T. J. Estes, “Physical Separation Process Demonstrations-A Review of Three Dredging Projects,” DOER Technical Notes Collection, ERDC TN-DOER-T10, Vicksburg, MS, USA, 2011.
- [30] J. Riordan, J. P. Murphy, J. R. Harrington, “Construction and Demolition Waste and Dredge Material as Landfill Liner in Ireland,” *1st Middle European Conference on Landfill Technology*, 2008.
- [31] M. A. Chikouche, E. Ghorbel, M. Bibi, “The possibility of using dredging sludge in manufacturing cements: optimization of heat treatment cycle and ratio replacement,” *Construction and Building Materials*, vol. 106, pp. 330-341, 2016.
- [32] W. Liu, H. Cui, Z. Dong, F. Xing, F. Zhang, T. Y. Lo, “Carbonation of concrete made with dredged marine sand and its effect on chloride binding,” *Construction and Building Materials*, vol. 120, pp. 1-9, 2016.
- [33] GLC, “Beneficial Uses of Great Lakes; Dredged Material: A Report of the Great Lakes Beneficial Use Task Force,” Great Lake Commission, Ann Arbor, USA, 2001.
- [34] P. J. Kelly, “In USACE/American Association of Port Authorities Quality Partnership Initiative-Emerging Technologies,” Miami River Project, VA: American Association of Port Authorities, USA, 2008.
- [35] A. Taylor, J. McWilliams, H. Van Dam, B. Lammers, “Deepening, cleaning and processing sediment from the miami river,” *Terra et Aqua*, no. 103, pp. 23-30, 2006.
- [36] D. E. Highley, L. E. Hetherington, T. J. Brown, D. J. Harrison, G. O. Jenkins, “The Strategic Importance of the Marine Aggregate Industry to the UK,” Research Report OR/07/019, Nottingham, United Kingdom, 2007.
- [37] TÜBİTAK MAM, “Deniz Dip Tarama Uygulamaları ve Tarama Malzemesinin Çevresel Yönetimi (DİPTAR),” Final Raporu, Proje No: 111G036, TÜBİTAK KAMAG 1007 Projesi, Kocaeli, Türkiye, 2016.
- [38] SM, 2012, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewaters, 22nd ed., APHA/AWWA/Water Environment Federation, American Public Health Association Publication, Washington, USA.
- [39] USACE, 2001, Long-Term Management Strategy (LTMS) for the Placement of Dredged Material in the San Francisco Bay Region, Appendix R: Dredged material at landfills, USA.
- [40] T. J. Olin-Estes and M. R. Palermo, “Recovery of dredged material for beneficial use: the future role of physical separation processes,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 85, pp. 39-51, 2001.

- [41] G.-Q. Li, W.-L. Wang, Z.-Y. Huo, Y. Lu, H.-Y. Hu, “Comparison of UV-LED and low pressure UV for water disinfection: Photoreactivation and dark repair of *Escherichia coli*”, *Water Research*, vol. 126, pp. 134-143, 2017.
- [42] D. Tonon, A. L. Tonetti, B. C. Filho, D. A. C. Bueno, “Wastewater treatment by anaerobic filter and sand filter: Hydraulic loading rates for removing organic matter, phosphorus, pathogens and nitrogen in tropical countries”, *Ecological Engineering*, vol. 82, pp. 583-589, 2015.
- [43] J. O. Kim, J. Choi, S. Lee, J. Chung, “Evaluation of hydrocyclone and post-treatment technologies for remediation of contaminated dredged sediments,” *Journal of Environmental Management*, vol. 166, pp. 94-102, 2016.
- [44] F.A. Benn, P.D. Fawell, J. Halewood, P.J. Austin, A.D. Costine, W.G. Jones, N.S. Francis, D.C. Druett, D. Lester, “Sedimentation and consolidation of different density aggregates formed by polymer-bridging flocculation”, *Chemical Engineering Science*, 2018 (in press).
- [45] J. E. Lee, J. K. Lee, H. K. Choi, “Filter press for electrodeewatering of waterworks sludge”, *Drying Technology*, vol. 25, pp. 1649-1657, 2007.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 12.10.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 01.04.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.343027	

Sol-jel yöntemi ile zirkonyum fosfat ve poli (etilen oksit) temelli polimer kompozit malzeme (ZRP/PEO) sentezi ve karakterizasyonu

Asuman Celik Küçük^{*1}, Emrah Demirkal¹

ÖZ

Bu çalışmada, sol-jel yöntemi ile tetraetil ortosilikat (TEOS) ön başlatıcısı varlığında zirkonyum fosfat (ZrP) ve Poli (etilen oksit) temelli ZrP/ PEO kompozit malzemesi üretilmiştir. Hazırlanan malzemenin yapısı X-ışını difraksiyonu (XRD) ve Fourier transform IR spektroskopisi (FTIR) yöntemleri ile incelenmiştir. Isısal özellikleri ise termal gravimetrik analiz (TGA) ile incelenmiştir. TGA analizinde, sentezlenen malzemenin 300 °C'e kadar kararlı olduğu bulunmuştur. Üretilen bu malzemenin maliyeti düşüktür, ayrıca ısıtıldığında 100 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda 300 °C ye kadar bozulmaya uğramamaktadır. 300 °C'ye kadar olan ısısal kararlılığı ve su tutma kabiliyeti sayesinde ZrP/PEO kompozit malzemesi, ara sıcaklık yakıt pillerinde kullanılabilme potansiyeline sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Zirkonyum ve Poli (etilen oksit) temelli kompozit malzeme, sol-jel, karakterizasyon

Synthesis and characterization of zirconium phosphate and poly(ethylene oxide) based polymer composite

ABSTRACT

In this study, by using tetraethyl orthosilicate (TEOS) as precursor, a composite material based on the zirconium phosphate and poly (ethylene oksit) (PEO) polymer (ZrP / PEO) has been prepared through the sol-gel method. The characterisation of the obtained material has been carried out by using flourer transform–infrared spectroscopy (FTIR) and X-ray diffraction (XRD) methods. Thermal properties have been investigated with thermal gravimetric analyzing (TGA). It has been founded that ZrP/PEO polymer composite material is stable even up to 300 °C. Thanks to the thermal stability and water uptake ability, ZrP/PEO polymer composite is the promising candidate to be used as a medium temperature fuel-cell electrolyte material.

Keywords: Zirkonium and Poly(ethylene oxide) based polymer composite, sol-gel, characterization

* Asuman Celik Kucuk

¹ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, asuman.celik@marmara.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde Nafyon temelli proton değişim membranları (PEM), yakıt pillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilinen en başlıca kısıtlamaları; suyun kaynama sıcaklığının üzerinde bozulmalara uğramaları ve florlu malzemeler oldukları için yüksek maliyetli olmalarıdır. Bu kısıtlamaların önüne geçebilmek için alternatif malzemeler üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır [1,2]. Bu malzemeler arasında Poli-Eter-Eter-Keton (PEEK), Polibenzimidazol (PBI) gibi organik bileşikler ve bunların inorganik malzemeler ile kompozitleri gelmektedir [3]. Ayrıca bu malzemelerin, yüksek sıcaklıklarda proton iletkenliklerinin iyi olmasından dolayı Nafyon'un yetersiz kaldığı 100 °C - 200 °C ara sıcaklıklarında kullanılma potansiyelleri vardır.

Bjerrum ve çalışma arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, PBI'e fosforik asit (H₃PO₄) katkılanmış ve proton iletkenlik değişimi incelenmiştir. 200 °C'de, 1 mol PBI'e 5,6 mol fosforik asit ilave edilip %5 oranında nemlendirilmiştir. Elde edilen malzemenin proton iletkenliği $6.8 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$ olarak bulunmuştur. Zirkonyum fosfat (ZrP), iki katmanlı ve bu katmanlar arasında suyu tutabilecek bir yapıya sahip bir katı asittir. Aynı koşullar altında kütlece %15 ZrP ilave edilerek oluşturulan kompozit malzemenin proton iletkenlik değeri $9.6 \times 10^{-2} \text{ Scm}^{-1}$ olarak bildirilmiştir [4]. Bir başka çalışmada, farklı oranlarda zirkonyum fosfat içeren Poli-Eter-Eter-Keton-Sülfon/Zirkonyum Fosfat (PEEK-S/ZrP) membranları oluşturulmuş ve 100 °C'de ve 100% nemli ortamda proton iletkenlikleri incelenmiştir. Polimerlere eklenen inorganik madde miktarı arttıkça, kompozit membranların proton iletkenliklerinin 0.08 Scm^{-1} 'e kadar arttığı gözlemlenmiştir [5].

Yakıt pillerinde, yapının difüzyonunu kolaylaştırmak ve yüksek iletkenliğe ulaştırabilmek için genellikle hidrofilik poli (etilen oksit) (PEO) polimerin ana zincir olarak seçilmesi tercih edilir. Örneğin, PEO ile sonlandırılmış imidazol temelli proton iletken malzeme, proton iletkenliğinin hidrojen bağının yapısal bozulmalarına bağlı olduğunu göstermiştir [6-8]. Aynı zamanda Armand ve arkadaşları fosforik asit doplu PEO filminin proton iletkenliğinin PEO zincirinin hareketliliği ile orantılı olarak arttığını rapor etmişlerdir [9]. PEO' in kullanılmasının nedeni, bu polimerin iyon transferi amorf yapıdaki

elektrolit malzemelerde, kristal yapıdaki elektrolitlere göre 2-3 kat daha hızlı olmasıdır. Bu yüzden mümkün oldukça camlaşma geçiş sıcaklığı (T_g) düşük ve amorf filmler kullanılır. Düşük T_g sıcaklığına sahip bu polimerler esnek olduklarından yüksek proton iletkenliğine sahiptirler. Stevens ve Mellander ve çalışma arkadaşları ilk PEO temelli organik-inorganik kompozit membran hazırlamışlar ve malzemenin oda sıcaklığında proton iletkenliğinin $2 \times 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ seviyesinde olduğunu bildirmişlerdir [10]. Daha sonrasında, Honma ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, sol-jel yöntemi ile SiO₂/PEO polimer kompozit membran üretilmiştir. Bu membran'ın 160 °C ve 100% nem altında herhangi bir bozulmaya uğramadan kararlı bir şekilde kaldığı ve proton iletkenliğinin $1 \times 10^{-4} \text{ Scm}^{-1}$ olduğu bildirilmiştir [11]. Başka bir çalışmada Jingyu Xi ve arkadaşları tarafından PEO temelli süper asit SO₄²⁻ ve ZrO₂ dolgu maddesi içeren yeni bir nano kompozit polimer hazırlanmış ve bunun Li iyon iletkenliğini incelenmiştir. Bu kompozite ait iyonik iletkenlik, $2.1 \times 10^{-5} \text{ Scm}^{-1}$ olarak bulunmuştur [12].

Bu çalışmada ZrP ana başlatıcısı, ön başlatıcı olan TEOS ile beraber kullanılarak sol jel yöntemi ile PEO ile etkileştirilmiştir ve ZrP temelli ZeP/PEO polimer kompozit hazırlanmıştır. Elde edilen polimer kompozit malzemenin karakterizasyonu FTIR ve XRD ile, ısısız kararlılığı ise TGA ile yapılmış ve ayrıca su tutma kapasitesi incelenmiştir. Hazırlanan kompozit malzeme, yüksek sıcaklıklarda dahi suyu hapsedme kapasitesine sahip ZrP partikülleri içermektedir. Bundan dolayı, 100 °C üzerindeki sıcaklıklarda yetersiz kalan Nafyon ve benzeri polimerlere alternatif olmaya aday olabileceği düşünülmektedir.

2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

Sigma-Aldrich' ten temin edilen Poli(etilenoksit) (Sıvı, Aldrich) ve Zirkonyumklorid Oktahidrat (Toz, 98%), sol-jel yönteminde ön başlatıcı olarak kullanılmıştır. Deney kısmında çözücü olarak Propanol ($\geq 99.5\%$, Sigma) ve Poli(etilenoksit)'in hidroliz ve polimerizasyon reaksiyonlarını kontrol altında tutmak için yüzey aktifleştirici olarak Asetilaseton ($\geq 99\%$, Sigma-Aldrich) kullanılmıştır. Zirkonyum fosfat partiküllerinin

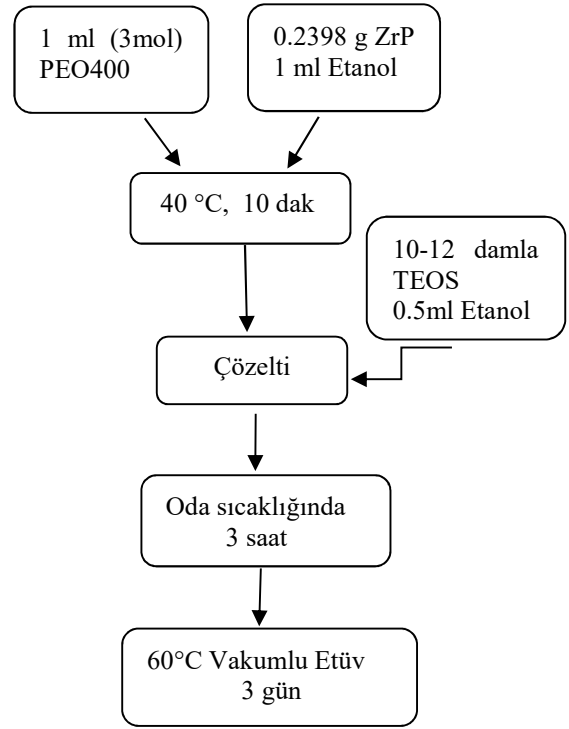
sentezlenmesi için Fosforik Asit (99.999% Aldrich) kullanılmıştır. Deneyde son olarak bağlayıcı olarak Tetraetil ortosilikat (TEOS) kullanılmıştır.

2.2. Zirkonyum fosfat (ZrP) sentezi (Synthesis of zirconium phosphate)

Hazır olarak alınan zirkonyum klorit oktahidrat ve o-fosforik asit (%85) kullanılarak zirkonyum fosfat (ZrP) bileşiği elde edilmiştir. Belirli konsantrasyonlarda hazırlanan 0.078 M $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ ve 0.078 M H_3PO_4 çözeltiler birleştirilerek, oda sıcaklığında ZrP partikülleri tamamen çökene kadar karıştırılmıştır. Elde edilen partikülleri çözeltiden ayırmak için 400 rpm de 5 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Bu işlem birkaç defa daha saf su ile tekrar edilmiş ve ZrP partikülleri filtre edilerek çözeltiden alınmıştır. Filtrasyon işlemi için pore boyutu 0.45 μm filtre kağıdı kullanılmıştır. Filtrasyon işleminden sonra elde edilen partiküller vakumlu etüvde kurutulup sonrasında desikatörde muhafaza edilmiştir. ZrP partiküllerinin karakterizasyonu XRD ve FTIR spektroskopisi yöntemleri kullanılarak yapılmıştır.

2.3. Sol-Jel Yöntemi ile kompozit Malzeme (ZrP/PEO) hazırlanması (Synthesis of polymer composite by sol-gel method)

Şema 1 de görüldüğü gibi, PEO400 (1 ml, 3mol), ZrP (0,2398 g, PEO'nun % 12,5 w/w) ve 1 ml etanol içerisinde 40 °C'de 10 dakika karıştırılmıştır. Hazırlanan bu çözeltilere 0,5 ml etanol içerisinde, 10-12 damla TEOS ön başlatıcısı ilave edilmiştir. Çözelti oda sıcaklığında 3 saat boyunca karıştırma işlemine tabii tutulmuştur. Jelleşmesi için 60 °C'de vakumlu bir etüvde 3 gün kurumaya bırakılmıştır. Kurutma işleminden sonra elde edilen numunenin FT-IR, XRD ve TGA ile karakterizasyonu tamamlanmıştır.



Şema 1. Sol jel yöntemi ile ZrP/PEO polimer kompozit malzemesinin hazırlanma süreci

2.4. Malzemelerin Karakterizasyonu (Characterization of materials)

2.4.1. FT-IR Analizi (FTIR Analysis)

ZrP/PEO polimer kompozitinin karakterizasyonu için FTIR analizleri Brumer marka LUMOS model FTIR cihazı ile 4000 - 650 cm^{-1} arasında yapıldı.

2.4.2. XRD Analizi (XRD Analysis)

Numunelerin kompozisyon incelemesi Rigaku marka D-Max 2200(Cu $K\alpha$ ışınım) model XRD cihazı kullanılarak yapılmıştır. Analizler 10-90° θ arasında yapılmıştır.

2.4.3. TGA Analizi (TGA Analysis)

Numunelerin ısısal özellikleri için Perkin Elmer marka, TGA 4000 model TGA cihazı kullanılmıştır. Analizler dakikada 10 °C artırılarak 30 °C - 790 °C sıcaklıkları arasında azot atmosferi altında yapılmıştır.

2.4.4. Su Tutma Kapasitesi (Water Uptake)

Kompozit malzemelerin su tutma kapasiteleri, su içinde bekletilip nemlendirildikten sonraki ağırlık farkları hesaplanıp belirlenir. Hazırlanan ZrP/PEO polimer kompozit, 4 saat deiyonize suda bekletildi. Yüzeyinde absorbe ettiği su peçete ile silip hızlıca tartıldı ve sonrasında 12 saat 40 °C etüvde bekletilip kuru numune tartıldı. Aşağıdaki eşitlikte (Eş.1), iki ölçümün farkı kullanılarak ZrP/PEO polimer kompozitin % su tutma kapasitesi bulunmuştur.

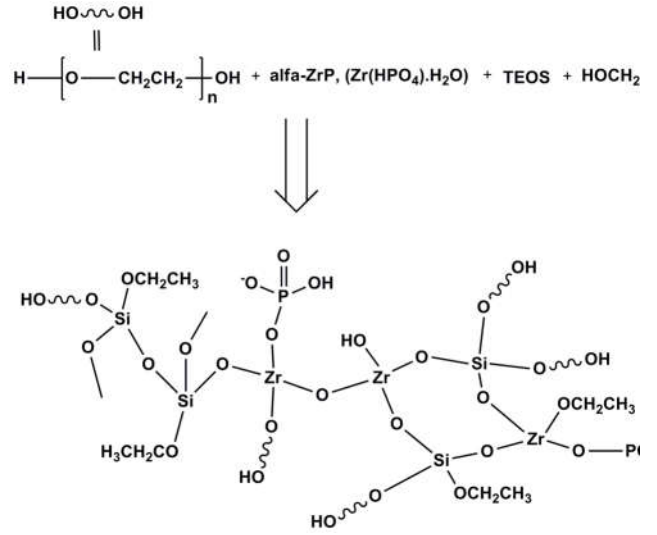
$$Su - Tutma(\%) = \frac{W_{ıstak} - W_{kuru}}{W_{kuru}} \times 100 \quad (1)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Fosforik asit, su gibi yüksek dielektrik özelliklerine sahiptir ve bronsted bazdır. Bu özelliklerinin yanında, düşük uçuculuk özelliğinden dolayı, suya alternatif olarak yüksek sıcaklıkta PEMFC'lerde yaygın kullanıma sahiptir.

Tasarlanan ZrP/PEO polimer kompozit, yüksek sıcaklıklarda suyu hapsetme kapasitesine sahip zirkonyum fosfat (ZrP) partikülleri barındırmaktadır. ZrP bu çalışmada $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ molekülünden elde edilmiştir. Fosforik asit grubu asit kaynağı olarak kullanılmıştır. Fosforik asit Zr ile yapıya kovalent olarak bağlanacağından sistemde herhangi bir sızıntıya sebebiyet vermeyecektir.

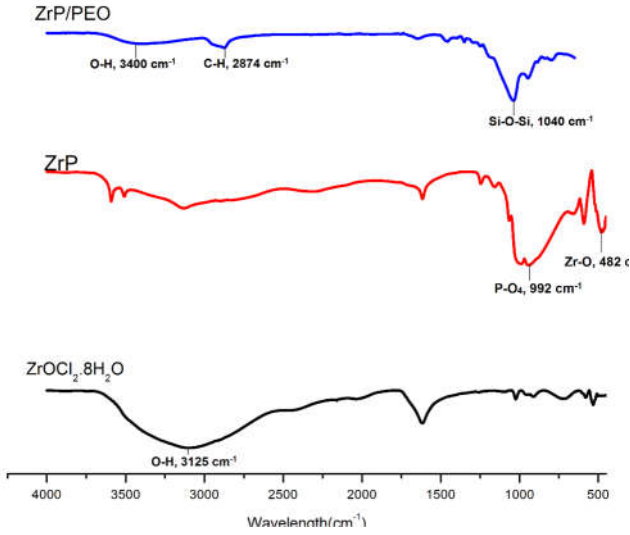
Bu çalışmada, PEO ana zincirinin kullanılması ile yapının difüzyonunun kolaylaştıracağından dolayı sol jel yöntemi ile ZrP ve PEO polimeri etkileştirilmiş. İlk kez bu çalışma kapsamında ZrP/PEO polimer kompozit tasarlanmış ve üretilmiştir. Şema 2'de öngörülen kimyasal yapısı verilmiştir. Elde edilen ZrP/PEO polimer kompozit malzemenin ilk olarak karakterizasyonu FTIR ve XRD ile ısısız kararlılığı termal gravimetrik analiz (TGA) yöntemi ile incelenmiştir.



Şema 2. ZrP-PEO polimer kompozit malzemesinin öngörülen ağ yapısı

3.1. FTIR Analizi (FTIR analysis)

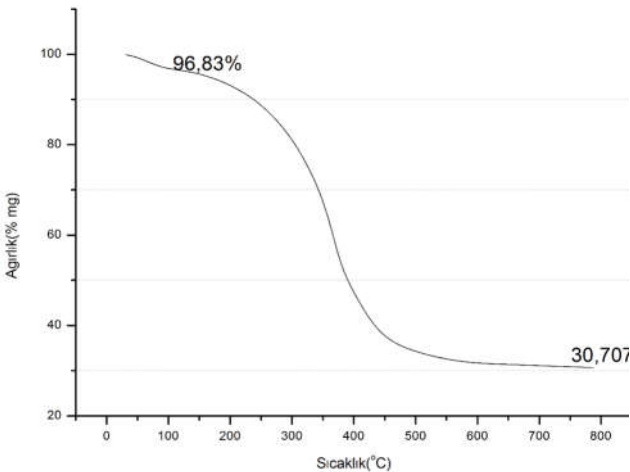
Şekil 1'de $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$, ZrP ve ZrP-PEO kompozit malzemelerin FTIR spektrumları verilmiştir. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ ya ait spektrumda, 3125 cm^{-1} suya ait O-H gerilmesi gözlenmektedir. ZrP'ye ait FTIR spektrumunda, 992 cm^{-1} P-O₄ gerilmesi ve 482 cm^{-1} de Zr-O gerilmesi gözlenmektedir. ZrP/PEO polimer kompozit malzemesine ait FTIR spektroskopisinde, ZrP'a ait spesifik P-O₄ gerilmesi 992 cm^{-1} de ve Zr-O gerilmesi ise 482 cm^{-1} de gözlenmektedir. Polimer kompozit içerisindeki PEO yapısına ait O-H gerilmesi 3400 cm^{-1} de, 2874 cm^{-1} de ise TEOS, etanol ve PEO ya ait C-H gerilmesine görülmektedir. Ayrıca 1040 cm^{-1} de TEOS'a ait Si-O-Si gerilmesi açıkça görülmektedir. 992 cm^{-1} de ki P-O₄ piki ise 1040 cm^{-1} deki Si-O-Si gerilmesi ile çakıştığı düşünülmektedir. Kompozit malzemede $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$ 'nun FTIR spektrumunda açıkça gözükken serbest H₂O gerilmesi ZrP'nin FT-IR spektrumunda oldukça azalmış ve ZrP/PEO polimer kompozitin FTIR spektrumunda ise neredeyse hiç kalmamıştır. Buda ortamda kalan nemin büyük kısmının birincil veya ikincil etkileşimler (Hidrojen bağı) ile yapıya katıldığını göstermektedir.



Şekil 1. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$, ZrP partikülleri ve ZrP/PEO polimer kompozitin FTIR analizleri

3.2. TGA Analizi (TGA Analysis)

Hazırlanan numunenin ısıl dayanımı azot ortamında 1 dakikada 10 °C ısıtılarak incelenmiştir (Şekil 2). 100 °C de % 4.17 lik bir kayıp gözlenmiştir. Bu kaybın kompozit malzemenin yüksek su tutma kabiliyetinden dolayı fiziksel olarak etkileşip yapısına hapsettiği su olduğu düşünülmektedir. Eğriden görüldüğü üzere, ZrP/PEO polimer kompozit malzemenin 300 °C seviyelerinde organik kısım bozulmaya başlamıştır. 480 °C de, % 65'ini oluşturan organik kısım tamamen bozulmuştur. Geriye kalan % 30.7 luk kısmın Zr_2O_3 ve SiO_2 olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak, hazırlanan kompozit'in 200 °C ye kadar yakıt pillerinde kullanılma potansiyeline sahip olduğu açıkça görülmektedir.

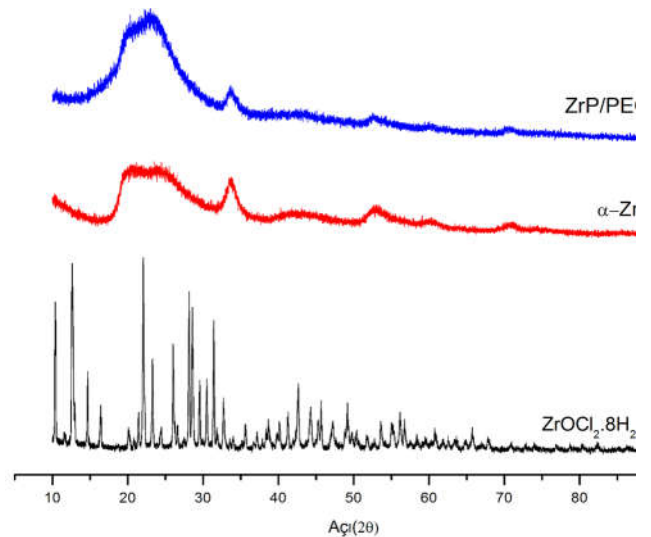


Şekil 2. ZrP/PEO polimer kompozit malzemesinin TGA analizi

3.3. XRD Analizi (XRD Analysis)

XRD ölçümü, kompozit malzemenin tek faz da oluşup oluşmadığı belirlemek için kullanılmıştır. XRD de görüldüğü üzere ticari olarak satın alınan zirkonil klorit oktahidrat ($ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$) kristal bir yapıdadır (Şekil 3). Bu çalışmada, fosforik asit ve zirkonil klorit oktahidrat kullanılarak elde edilen zirkonyum fosfat (ZrP) partiküllerinin amorf bir yapıda olduğu görülmektedir. Zirkonyum fosfat (ZrP), iki katmanlı ve bu katmanlar arasında suyu tutabilecek bir yapıya sahip bir katı asittir. ZrP yapısında içerdiği su molekül sayısına göre iki yolla tanımlanır [α , γ - $ZrP = Zr(HPO_4) \cdot nH_2O$ [α : ($n=1$); γ : ($n=2$)] 13].

ZrP ve PEO'nun TEOS varlığında sol jel yöntemi ile hazırlanan ZrP/PEO polimer kompozit malzemesinin XRD analizinde, PEO'nun amorf yapıdaki α -ZrP partikülleri ile yeni bir amorf faz oluşturduğu görülmektedir. Kompozit yapıya PEO'nun katılmasından sonra, 15-25° arasındaki kristalin saf PEO yapısına ait piklerin kaybolduğu görülmektedir. Ayrıca 15-30° aralığındaki amorf piklerin PEO yapısının yapıya dahil olmasından sonra arttığı ve 30-35° aralığındaki piklerin bu oranda azaldığı açıkça görülmektedir. Buda PEO'nun ZrP ile etkileştiğini ve yapıya kimyasal olarak bağlandığını açıkça göstermektedir (Şekil 3).



Şekil 3. $ZrOCl_2 \cdot 8H_2O$, ZrP partikülleri ve ZrP/PEO polimer kompozit malzemelerinin XRD analizleri

3.4. Su Tutma Kapasitesi (Water Uptake)

Zirkonyum fosfat temelli kompozit malzemelerin proton iletkenliği, Nafyon gibi Vehicle mekanizması üzerinden gerçekleşmektedir. Bu mekanizmaya göre, polimer omurgasına bağlı asit grupları (SO_3^{2-}) arasında protonun iletileceği bir yol oluşur ve taşıyıcı olarak proton çözücüsü ($\text{H}_2\text{O} - \text{H}_3\text{O}^+$) kullanılır. Bu mekanizmada; su fosfonik gruplar arasında protonların taşınması için bir köprü görevi görmektedir [14]. Yapıda ne kadar çok suyun olması o kadar iyonik iletkenliğin fazla olması anlamına gelmektedir. Bundan dolayı, suyu tutabilen grupların yapıda bulunması tercih edilir. Bu çalışmada hazırlanmış olan ZrP/PEO polimer kompozit, 4 saat deiyonize suda bekletildi ve Eş. 1'e göre yapılan ağırlık farkı hesaplamasında, %85 oranında su tutabildiği tespit edilmiştir. Bu oran, ZrP/PEO polimer kompozitin yüksek proton iletkenlik sağlama potansiyeline sahip olması adına oldukça ümit vericidir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İlk kez bu çalışmada TEOS ön başlatıcı varlığında ZrP ana başlatıcısı olarak kullanılmış ve PEO temelli ZrP/PEO polimer kompozit hazırlanmıştır. Elde edilen kompozit malzemenin karakterizasyonu, FTIR ve XRD ile, ısısız kararlılığı ise TGA yöntemi ile incelenmiştir.

Sol-jel işleminden sonra PEO'nun yapıya katılması XRD de; i) PEO polimerine ait kristalin piklerin kaybolması, ii) 15 - 30° aralığındaki amorf piklerin oranının artması ve iii) 30 - 35° aralığındaki piklerin bu oranda azalması ile ilişkilendirilmiştir.

FTIR analizlerinde ise $\text{ZrOCl}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ yapısında bulunan serbest suya ait gerilmenin ($\approx 3100 \text{ cm}^{-1}$), ZrP'nin FTIR spektrumunda oldukça azalması ve ZrP/PEO polimer kompozitin FTIR spektrumunda ise neredeyse hiç kalmaması ve 3400 cm^{-1} civarında hidrojen bağı yapmış -OH gerilmesinin varlığı, yapıda sadece birincil veya ikincil etkileşimlerin (Hidrojen bağı) olduğunu ve ZrP/PEO polimer kompozitin başarı ile sol-jel yöntemi ile hazırlandığını göstermiştir

Hazırlanan ZrP/PEO polimer kompozit, 300 °C'ye kadar kararlı olması ve su tutma kapasitesinin % 85 seviyesinde olmasından dolayı yakıt pillerinde alternatif bir elektrolit malzeme olma potansiyeline sahiptir. Bundan dolayı sonraki

çalışmalarda, farklı oranlarda ZrP barındıracak ZrP/PEO polimer kompozitlerin hazırlanması ve proton iletkenlik testlerini yapılması planlanmaktadır.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Çalışmada kullanılan kimyasallar ve cihazlar (hassas tartı, manyeti karıştırıcı, Etüv) Marmara Üniversitesi Babko projeleri (FEN-A-090517-0280 ve FEN-A-150513-0173) bütcesinden temin edilmiştir. Katkılarından dolayı Marmara Üniversitesi Babko birimine teşekkür ederiz. Ayrıca bu çalışma, 1919B011601917 başvuru numaralı Tübitak projesi tarafından kısmen desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Rikukawa, K. Sanui, Proton-conducting polymer electrolyte membranes based on hydrocarbon polymers, Prog. Polym. Sci. vol.25 pp.1463-502, 2000.
- [2] JD. Lichtenhan, Y.A. Otonari, MJ. Gan, Linear hybrid polymer building blocks: methacrylate-functionalized polyhedral oligomeric silsesquioxane monomers and polymers, Macromolecules, vol.28 pp.8435-8437, 1995
- [3] E. S. Cozza, Q. Ma, O. Monticelli and P. Cebe, 'Nanostructured nanofibers based on PBT and POSS: Effect of POSS on the alignment and macromolecular orientation of the nanofibers', European Polymer Journal, vol. no. 49, pp. 33-40, 2013.
- [4] R. He, Q. Li, G. Xiao and N.J. Bjerrum, 'Proton conductivity of phosphoric acid doped polybenzimidazole and its composites with inorganic proton conductors'. Journal of Membrane Science, vol. 226 pp.169-184, 2003.
- [5] B. Bonnet, D.J. Jones, L. Tchicaya, G. Alberti, M. Casciola, L. Massinelli, B. Bauer, A. Peraio and E. Ramunni, 'Hybrid organic-inorganic membranes for a medium temperature fuel cell'. Journal of New materials for Electrochemical Systems, vol.3, pp.87-92, 2000.

- [6] Q. Li, R. He, J.Q. Jensen and N.J. Bjerrum, 'Approaches and recent development of polymer electrolyte membranes for fuel cells operating above 100 °C'. Chem Mater, vol.15 no.26, pp.4896–4915, 2003.
- [7] M. Linlin, 'Poly(2,5-benzimidazole)-silica nanocomposite membranes for high temperature proton exchange membrane fuel cell', Journal of Membrane Science, vol.411-412, pp.91-98, 2012.
- [8] W. Shuang, Z. Chengji, M. Wenjia, Z. Gang, L. Zhongguo, N. Jing, L. Mingyu, 'Preparation and properties of epoxy-cross-linked porous polybenzimidazole for high temperature proton exchange membrane fuel cells', Journal of Membrane Science 411-412, 54-63, 2012
- [9] X. Meng and Z. Xian, 'Structure and thermal behavior of EPDM/POSS Composite Fiber Prepared by Electrospinning', Journal of applied polymer science, DOI; 10.1002/app.38349.
- [10] J. R. Stevens and B.E. Mellander, 'Poly(ethylene oxide)-alkali metal-silver halide salt systems with high ionic conductivity at room temperature' Solid State Ionics, vol.21, pp.203-206, 1986.
- [11] I. Honma, Y. Takeda, J.M. Bae, 'Protonic conducting properties of sol-gel derived organic/inorganic nanocomposite membranes doped with acidic functional molecules', Solid State Ionics, vol.120, pp.255–264, 1999.
- [12] J. Xi and X. Tang, Nanocomposite polymer electrolyte based on Poly(ethylene oxide) and solid super acid for lithium polymer battery, Chemical Physics Letters, vol. 393, pp.271–276, 2004.
- [13] A. Clearfield, 'Inorganic ion exchangers with layered structures', Annual Reviews Material Science, vol.14, pp.205, 1984
- [14] S.J. Peighambardoust, S. Rowshanzamir, M. Amjadi, 'Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications', International Journal of Hydrogen Energy, vol.35, pp.9349-9384, 2010.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 14.11.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 02.04.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.352785	

Bor oksit tozunun fren balatalarının tribolojik özelliklerine etkisi

Gülşah Akıncıoğlu¹, Sıtkı Akıncıoğlu¹, İlyas Uygur¹, Hasan Öktem²

ÖZ

Bu çalışmada, Renault Clio otomobilin fren balatası, bor oksit tozu katkısı ile sıcak presleme yöntemiyle üretilerek, bor oksit tozunun balatanın tribolojik özellikleri üzerine etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Son yıllarda çevre dostu malzemelerin kullanılmasının önem kazanmasından dolayı fren balatasının içeriğinde bor oksit kullanılmıştır. Ayrıca bu malzemenin seçilmesinde ülke ekonomisine fayda sağlamakta amaçlanmıştır. Karşılaştırma yapmak için ticari Clio balatası kullanılmıştır. Balata numunelerinin aşınma sürtünme deneyleri Chase tipi cihazda yapılmıştır. Bor oksit katkısının fren balatasının aşınma sürtünme performansına etkisi ticari fren balatasının sonuçlarıyla kıyaslanarak incelenmiştir. Sonuçta bor oksit katkısının sürtünme katsayısına olumlu etki yaptığı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Fren balatası, Chase tipi cihaz, Aşınma sürtünme testi

The effects of boron oxide powders on the tribological properties of brake pads

ABSTRACT

In this study, the Renault Clio car was produced by hot press method with boron oxide powder additive and the effect on the tribological properties of the boron oxide additive was experimentally investigated. In recent years, the use of environmentally friendly materials has become important, so boron oxide has been used in the brake pad. Also it aimed at providing benefits to the national economy in the selection of these materials. Clio commercial pads were used for comparison. Friction linings wear testing of samples are carried out Chase type device. The effect of the boron oxide additive brake wear on wear friction performance has been investigated in comparison with the results of commercial brake pad. As a result, it was observed that the boron oxide contribution has a positive effect on the friction coefficient.

Keywords: Brake pads, Chase type device, Wear and friction tests

*Corresponding Author

¹ Gülşah Akıncıoğlu, gulsahakincioglu@gmail.com

¹ Düzce Üniversitesi, Düzce /Türkiye

² Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli/Türkiye

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Fren balataları, sürtünme ile otomobillerdeki kinetik enerjiyi ısı enerjisine dönüştüren önemli frenleme sistemi parçalarıdır [1]. Son yıllarda üretilen ticari fren balatalarında yüzlerce farklı toz malzemenin kullanılmaktadır. Balatayı oluşturan bileşenler; takviye edici elyaflar, bağlayıcılar, dolgu malzemeleri ve sürtünme düzenleyiciler olarak sınıflandırılır [2, 3]. Balata kompozitini oluşturan bu malzemelerdeki çeşitliliğin nedeni, sürtünme katsayısını kararlı tutmak, iyi bir aşınma direnci sağlamak ve her durumda güvenilir bir frenleme performansı elde etmektir [4, 5]. İyi bir frenleme performansının yanı sıra kullanılan malzemelerin çevre dostu olmasının da önemi artmaktadır [3, 6-8]. İçeriğinde çevre dostu malzemeler olan sürtünme malzemelerinin, tribolojik testlerinin yapıldığı çalışmalar literatürde mevcuttur [8-10].

Fren balatalarını oluşturan toz malzemelerin bazıları yurt dışından ithal edilmektedir. Dışarıdan gelen bu toz malzemeler balata üretim maliyetini de artırmaktadır. Ülkemizde zengin maden yataklarına [11] sahip bir madde olan bor mineralinin fren balatası üretiminde doğal katkı olarak kullanılması hem çevre hem de ekonomimiz açısından faydalı olacaktır. WanNik ve arkadaşları çalışmalarında, bor katkılı fren balatalarının sürtünme performansını araştırmışlardır. Çalışmanın sonucunda bor katkılı balatalar ile ticari balata arasında sürtünme katsayılarında, sertliklerinde ve fren feydi miktarlarında büyük bir fark gözlemlenmiştir [10]. Mutlu ve arkadaşları, takviye edici elyaflar kompozitlerin maliyetini arttırdığı için çalışmalarında elyaf yerine; bakır tozu, borik asit, barit, alümina, kaşhev ve grafit kullanarak kompozisyonu oluşturmuşlardır. Borik asit eklenmiş balataların frenleme üzerine olumlu etkiler yaptığını ortaya çıkarmışlardır [12]. Yi ve Yan çalışmalarında, bor nitrür kullanarak bir kompozit üretmişlerdir. Yaptıkları testlerin sonuçlarında bor nitrür malzemesinin, sürtünme katsayısını sabitlemeye ve aşınma oranını düşürmeye etki ettiğini görmüşlerdir [13].

Yaptığımız bu çalışma da amaç, yerel kaynaklarımızdan elde ettiğimiz doğal katkı ile çevre dostu bir fren balatası üretebilmek hem de iyi bir frenleme performansı sağlayabilmektir. Deneylede %3 bor oksit katkılı fren balatası

numunesi kullanılarak, çıkan sonuçlar ticari balata ile kıyaslanmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Numune Hazırlama (*Sample Preparation*)

Deneylede kullanılan fren balatası numunelerinde 15 farklı toz malzeme kullanılmıştır. Alternatif katkı tozu olarak %3 oranında bor oksit tozu denenmiştir. Bor oksit katkılı fren balatasının kompozisyonu Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Fren Balatası Kompozisyonu (*Brake Pad Composition*)

Sıra no	Toz Malzeme Adı	Ağırlıkça Oran (%)
1	Çelik Yünü	15-20
2	Kaya Yünü	3-6
3	Kevlar	0,5-2
4	Grafit	5-7
5	Fenolik Reçine	6-8
6	Vermikülit	6-8
7	Pirinç Talaşı	4-6
8	Kalsiyum Hidroksit	7-9
9	Zirkonyum Silikat	3-5
10	Kükürt	0,5-1
11	Siyah Demir Oksit	1-3
12	Lastik Tozu	4-6
13	Barit	6-8
14	Kauçuk	2-4
15	Bor oksit	3

Balataların üretimi için toz malzemeler öncelikle sanayi tipi mikserde yaklaşık 15 dak. karıştırılmış ardından, tozlar balata kalıplarına dökülerek, 100 kg/cm² basınçta 180 °C'de 6 dak. boyunca preslenmiştir. Presleme esnasında 3 defa 10 sn. boyunca pres kalıptan geri çekilerek hava çıkışı sağlanmıştır. İmal edilen numune Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Bor oksit katkılı fren balatası
(Boron oxide brake pad)

2.2. Sertlik Testi (Hardness Test)

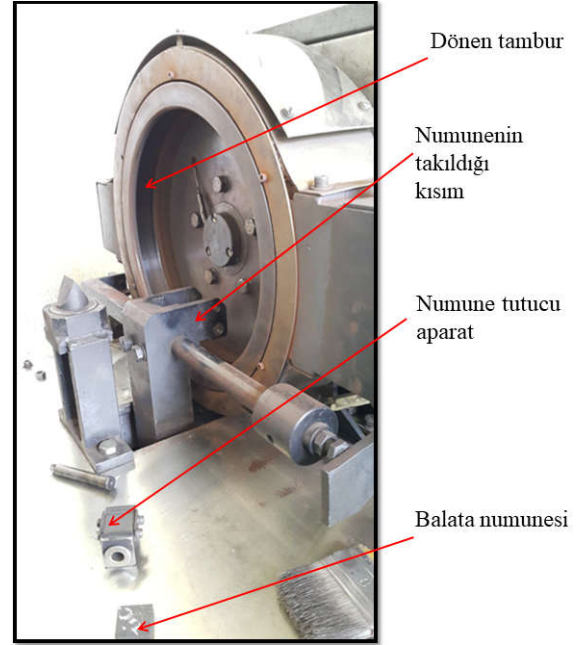
Numunelerin sertlik ölçümleri Shore D tipi test cihazı ile yapılmıştır. Sertlik ölçülürken numune üzerindeki 5 farklı noktadan değerler alınmış ve bu değerlerin ortalamasına göre sonuç elde edilmiştir.

2.3. Sıkıştırılabilirlik Testi (Compressibility Test)

Sıkıştırılabilirlik, katıların veya sıvıların tüm yüzeylerde basınç altındayken elastik özelliklerini tanımlayan, sayısal sabit bir değerdir [14]. Sıkıştırma testleri ISO 6310 standartlarına göre uygulanmaktadır. Malzemelere 1 sn. boyunca 160 bar basınç uygulanır ve bu süreç 3 defa tekrarlanır. Çıkan sonuçlara göre soğuk sıkıştırma oranı %2'den az olmalıdır.

2.4. Aşınma ve Sürtünme Testi (Wear and Friction Test)

Fren balatası numunelerine yapılan aşınma ve sürtünme testleri, Chase tipi cihazda ve SAE J661 standartlarına göre uygulanmıştır [15]. Aşınma sürtünme testi, dönen bir kampanaya karşı uygulanan 25,4x25,4x40 mm ebatlarında kesilmiş balata numunesiyle uygulanmaktadır. Kampana malzemesi DDL-20 (gri dökme demir) olup, kampananın maksimum dönme hızı 411 d/dak. ve maksimum uygulanan basınç 6,5 kg/cm²'dir. Sürtünme katsayısı soğuk (normal) ve sıcak sürtünme katsayısı olarak 2'ye ayrılır. Soğuk sürtünme katsayısında ölçümler 100 °C, 150 °C ve 200 °C'de yapılır. Sıcak sürtünme katsayısında ise, ölçümler 300 °C, 350 °C ve 400 °C'de yapılır. Yapılan deneylerde sürtünme katsayısı değeri beş defa tespit edilerek ortalaması alınır. Bulunan ortalama değer en az 0,25 μ olmalıdır. Şekil 2'de Chase tipi test cihazı ve cihaza uygun şekilde kesilen balata numunesi görülmektedir.



Şekil 2. Chase tipi cihaz ve balata numunesi (Chase type device and brake pads)

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Sertlik Testi (Hardness Test)

Fren balatası numunelerine ait sertlik değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Bor oksit katkılı balata için "BO" sembolü ticari katkılı balata için ise "Tic" sembolü kullanılmıştır. Ölçülen sertlik değerlerine göre BO numunesinin sertliği daha fazladır. Bor oksit katkılı numunenin sertliğinin daha yüksek olması, bor elementinin sertliğinin yüksek olmasıyla açıklanabilir. Mutlu ve arkadaşları da bor katkısı kullanarak ürettikleri balata numunelerinin, içeriğinde bor olmayan numunelere göre yaklaşık %20-25 shore D daha

sert olduğunu gözlemlemişlerdir. Bor oksit katkılı numunenin sertliği 90 shore D iken katkısız numunenin sertliği 71 shore D olarak ölçülmüştür [2]. Bor oksit katkısının sertliği arttırdığı söylenebilir.

Tablo 2. Balata numunelerinin sertlik değerleri
(Hardness values of brake pads)

Sıra	Balata Kodları	Sertlik (Shore D)
1	BO	89
2	Tic	86

3.2. Sıkıştırılabilirlik Testi (*Compressibility Test*)

Sıkıştırılabilirlik balata numunelerine yapılması gereken önemli testlerdendir. Balataların sertliğine, gözenekliliğine dair fikir vermesi açısından önemlidir. ISO 6310 standartlarına göre uygulanan sıkıştırma testi sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir. Sıkıştırma testi için yük üç defa uygulanmış ve sonuç bu üç değerın ortalaması alınarak bulunmuştur.

Tablo 3. Fren balatalarının sıkıştırma testi sonuçları
(Compression test results of brake pads)

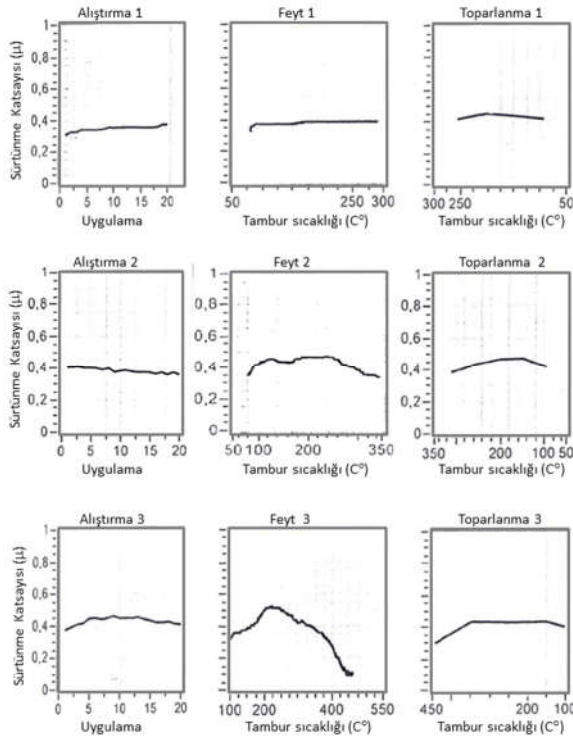
No	Numune	Sıkıştırma miktarı [μm]			
		1.yük	2.yük	3.yük	Ortalama
1	BO	207	348	358	304
2	Tic	187	282	290	253

Tic numunesinin sıkışma değeri bor oksit katkılı numuneye göre daha düşük çıkmıştır. Bor oksit katkılı numune daha sert olmasına rağmen daha fazla sıkıştırılabilmiştir. Bu durum bor elementinin gözenekli olması sebebiyle balatada boşluk oluşturmasıyla açıklanabilir. Gözenekler sebebiyle balatada oluşan boşluklar sıkışma miktarını arttırmıştır.

3.3. Aşınma ve Sürtünme Testi (*Wear and Friction Test*)

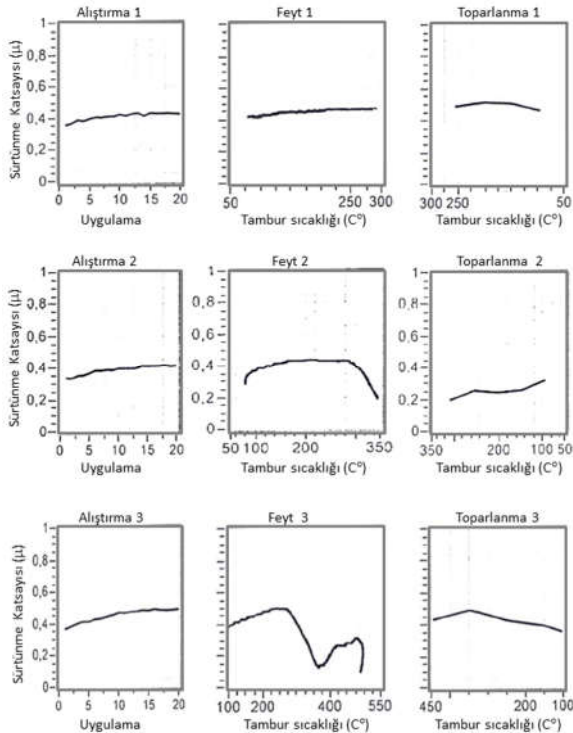
Balataların frenleme performanslarını belirlemek için aşınma sürtünme deneylerinin yapılması gereklidir. Yapılan deneylerin sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerleri balatanın frenleme verimini tahmin etmede kullanılır. Frenleme esnasında oluşan yüksek sıcaklık; fren zayıflamasına, erken aşınmalara, fren sıvısının

buharlaşmasına, yatak arızalarına, termik çatlaklara ve titreşimlere sebep olmaktadır. Sıcaklık frenleme performansına etki eden en önemli faktörlerden birisidir[16]. Chase tipi cihazda yapılan deney sonuçlarına göre elde edilen sürtünme katsayısı grafikleri Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir. Bor oksit katkılı BO numunesine ait grafiklerde, feyd 3'te sıcaklığın 400 °C'yi geçmesinden dolayı sürtünme katsayısında aşırı bir azalma meydana gelmiştir. Hatta sürtünme katsayısındaki azalma 300 °C'den itibaren başlamıştır. Bor oksit katkısının 300°C'den sonra sıcaklık artışı sebebiyle etkisini kaybettiği düşünülebilir. Mutlu ve ark. çalışmalarında bor oksit katkılı balata numunesinin 300 °C'ye kadar iyi bir frenleme performansı gösterdiğini sonrasında düşüş gösterdiğini tespit etmişlerdir [2, 12]. Balatanın toparlanma aşamasında sürtünme katsayısı bir süre artmış ve ardından kararlı hale gelerek, olması gereken değer aralığında frenleme yapmaya devam etmiştir. Ticari numuneye ait grafiklerde, feyd 3'te sıcaklığın 400 °C'ye yaklaşmasıyla beraber sürtünme katsayısında ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Sıcaklık arttıkça azalma devam etmiştir ve sürtünme katsayısı ortalama olarak standartların çok altında kalmıştır. Genel olarak numunelerin aşınma sürtünme performansı değerlendirildiğinde; sürtünme katsayısı yüksektir ancak sıcaklığa çok dayanıklı değildir. Soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri arasında çok fark vardır ve istenmeyen bir durumdur. Boz ve Kurt yaptıkları çalışmada, ürettikleri ZrSiO₄ katkılı numuneleri, chase tipi cihazda, SAE J661 standardına göre denemişlerdir. Numunelerin bazılarının sıcak ve soğuk sürtünme katsayılarının sonuçları arasında da fark gözlemlemişlerdir [17].



Şekil 3. Bor oksit katkılı numunenin aşınma sürtünme testi grafikleri

(Wear friction test graphics of boron oxide based sample)



Şekil 4. Ticari numunenin aşınma sürtünme testi grafikleri

(Wear friction test graphics for commercial sample)

Chase tipi cihazda SAE J661 standartlarına göre yapılan deney sonuçlarına göre elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir. SAE J661 standartlarında sürtünme

katsayısı değerleri harf sembolleriyle sınıflandırılmıştır. Her iki numunede soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değeri "F" harf sembolüne göre elde edilmiştir. Buna göre deneylerin sonucunda bulunan sürtünme katsayısı değerleri standart aralıklardadır. Bor oksit katkılı numunenin sürtünme katsayısı değeri ticari balataya göre yaklaşık %18 fazla çıkmıştır.

Tablo 4. Fren balatalarının normal ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri

(Normal and hot friction coefficient values of brake pads)

Numune	Soğuk Sürtünme Katsayısı (μ)	Sıcak Sürtünme katsayısı (μ)	Sınıfı
BO	0,437	0,425	FF
Tic	0,398	0,362	FF

Algan çalışmasında %5 oranında boraks kullanarak ürettiği balata numunesine chase tipi cihazda test yapmıştır. Elde edilen sürtünme katsayısı değerleri 0,3 μ - 0,4 μ aralığındadır [18].

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Fren balatası numunesi bor oksit katkısı yapılarak presleme yöntemiyle üretilebilmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda fren balatası numunelerinden elde edilen değerler standartlara uygun olarak bulunmuştur. Özellikle 200-250 °C sıcaklıklara kadar sürtünme katsayısı sonuçları kararlı bir şekilde ilerlemiştir. Artan sıcaklıkla birlikte sürtünme katsayıları düşüşe geçmiştir. Aşınma sürtünme deneyleri sonuçlarına göre sürtünme katsayısı değerleri, sertlik ve sıkıştırma testleri sonuçları standartlara uygundur.


İlerleyen süreçte balata içeriğindeki bor oksit miktarının artırılmasıyla deneyler tekrar edilebilir. Çalışmada %3 olarak kullanılan bor oksit miktarı sürtünme katsayısını yaklaşık %18 arttırmıştır. Bor oksit miktarı %6, %9, %12 ve %15 oranlarında kullanılarak aşınma sürtünme performansı ve tribolojik özellikler tekrar değerlendirilebilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yaptığımız çalışmada desteklerini esirgemeyen Balataacılar Balataçılık Sanayi ve Ticaret AŞ'ye ve başta Kimya Mühendisi Simge Uzun olmak üzere bütün çalışanlarına teşekkür ederiz.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Jacko and S. Rhee, "Brake linings and clutch facings," *Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology*, 1992.
- [2] I. Mutlu, O. Eldogan, and F. Findik, "Production of ceramic additive automotive brake lining and investigation of its braking characterisation," *Industrial Lubrication and Tribology*, vol. 57, pp. 84-92, 2005.
- [3] P. W. Lee and P. Filip, "Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials," *Wear*, vol. 302, pp. 1404-1413, 2013.
- [4] N. Aranganathan and J. Bijwe, "Development of copper-free eco-friendly brake-friction material using novel ingredients," *Wear*, vol. 352, pp. 79-91, 2016.
- [5] W. Österle, C. Prietzel, H. Kloß, and A. Dmitriev, "On the role of copper in brake friction materials," *Tribology International*, vol. 43, pp. 2317-2326, 2010.
- [6] R. Yun, P. Filip, and Y. Lu, "Performance and evaluation of eco-friendly brake friction materials," *Tribology International*, vol. 43, 2010.
- [7] E. Omrani, P. L. Menezes, and P. K. Rohatgi, "State of the art on tribological behavior of polymer matrix composites reinforced with natural fibers in the green materials world," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 19, pp. 717-736, 2016.
- [8] L. Barros, P. Neis, N. Ferreira, R. Pavlak, D. Masotti, L. Matozo, *et al.*, "Morphological analysis of pad-disc system during braking operations," *Wear*, vol. 352, pp. 112-121, 2016.
- [9] H. Öktem, İ. Uygur, G. Akıncıoğlu, D. Kır, and H. Karakaş, "Evaluation of non-asbestos high performance brake pads produced with organic dusts," ed: Metal, 2015.
- [10] W. Wannik, A. Ayob, S. Syahrullail, H. Masjuki, and M. Ahmad, "The effect of boron friction modifier on the performance of brake pads," *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, vol. 7, pp. 31-35, 2012.
- [11] E. M. İ. G. Müdürlüğü, "Bor Sektör Raporu," 2009.
- [12] I. Mutlu, C. Oner, and F. Findik, "Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings," *Materials & design*, vol. 28, pp. 480-487, 2007.
- [13] G. Yi and F. Yan, "Effect of hexagonal boron nitride and calcined petroleum coke on friction and wear behavior of phenolic resin-based friction composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 425, pp. 330-338, 2006.
- [14] R. Steege and F. Marx, "A new approach to material compressibility of brake pads," SAE Technical Paper 0148-7191, 2008.
- [15] A. Spencer, W. M. Spurgeon, and J. Winge, "Four tests for consistency of automotive brake linings," SAE Technical Paper 0148-7191, 1966.
- [16] S. Anoop, S. Natarajan, and S. K. Babu, "Analysis of factors influencing dry sliding wear behaviour of Al/SiCp-brake pad tribosystem," *Materials & Design*, vol. 30, pp. 3831-3838, 2009.
- [17] M. Boz and A. Kurt, "Effect of ZrSiO₄ on the friction performance of automotive brake friction materials," *Journal of materials science & technology*, vol. 23, p. 843, 2007.
- [18] İ. B. Algan and A. Kurt, "The Effect of Metal Fibres and Borax Powders on the Wear and Friction Performances of the Organic Based Brake Pads," *Металлофизика и новейшие технологии*, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 15.11.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 26.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.353379	

Karma Taguchi ve yüzey yanıt yöntemi kullanılarak astm b574 (hastelloy c-22)'in tornalanması esnasındaki işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi ve kesme parametrelerinin optimizasyonu

Gültekin Basmacı*¹, İsmail Kırbas², Mustafa Ay³, Musa Peker⁴

ÖZ

Bu çalışmada ASTM B574 (Hastelloy C-22) malzemesi üzerinde tornalama işlemi sonrasında kesme parametrelerinin (kesme derinliği, kesme hızı, radius, ilerleme hızı, debi, talaş açısı, yanaşma açısı) yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık üzerindeki etkileri incelenmiştir. Kesme parametrelerini etkileyen faktörleri belirlemek için varyans analizi (ANOVA) uygulanırken, yüzey pürüzlülüğünü etkileyen parametrelerin optimizasyonu Taguchi ortogonal deney tasarımına dayanan Tepki Yüzeyi Metodolojisi (RSM) ile elde edilmiştir. Geliştirilen modellerin yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık tahmini için gerekli olan doğruluğu oldukça başarılıdır. Ölçüt olarak R^2 değerinin kullanıldığı çalışmada ortalama Ra yüzey pürüzlülüğü için %93.85, doğruluk değeri elde edilmiştir. ANOVA analizleri sonucunda %95 güven aralığında, Ra için en etkili parametreler sırasıyla kesme hızı, yanaşma açısı, talaş açısı ve debi olarak tespit edilmiş ve en düşük yüzey pürüzlülüğü oranı için en uygun kesme parametre değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tepki Yüzeyi Metodolojisi, Taguchi Metodu, Varyans Analizi (ANOVA), ASTM B574 (Hastelloy C-22), Kesme Parametreleri, Yüzey Pürüzlülüğü, Parametre Optimizasyonu.

Optimisation and influence of cutting parameters on surface roughness during turning of astm b574 (hastelloy c-22) using a hybrid of Taguchi and rsm methods

ABSTRACT

In this study, the impact of cutting parameters (depth-of-cut, cutting speed, feed, flow, rake angle, lead angle) on surface roughness in the turning process with regard to ASTM B574 (Hastelloy C-22) material has been investigated. Variance analysis (ANOVA) has been applied in order to determine the factors affecting the surface roughness. The optimization of the parameters affecting the surface roughness has been obtained using Response Surface Methodology (RSM) based on the Taguchi orthogonal experimental design. The accuracy required for surface roughness and temperature estimation of the developed models is quite successful. As a criterion, when the value of R^2 is used, 93.85% accuracy value is obtained for the average Ra surface roughness. As a result of ANOVA analysis, the most effective parameters for Ra were determined as cutting speed, lead angle, rake angle and flow rate, respectively, at 95% confidence interval and optimal cut parameter values were determined for the lowest surface roughness ratio.

Keywords: Response Surface Methodology, Taguchi Method, Variance Analysis (ANOVA), ASTM B574 (Hastelloy C-22), Cutting Parameters, Surface Roughness, Parameter Optimisation.

¹ Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine, Burdur- gasmaci@mehmetakif.edu.tr

² Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar, Burdur- ismailkirbas@mehmetakif.edu.tr

³ Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine, İstanbul- muay@marmara.edu.tr

⁴ Muğla Sıtkı Kocaman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Muğla- pekermusa@gmail.com

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalatta talaş kaldırmanın önemli parametrelerinden birisi de kesici takım üzerine etki eden kesme kuvvetleridir. Bu parametre, kesici takım, tezgâh ve diğer gerekli aparatların tasarım ve imalatında dikkate alınmaktadır [1]. Kesme kuvvetleri; ilerleme miktarı, kesme hızı, talaş açısı, kesme derinliği, iş parçasının malzemesi gibi kesme parametrelerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Parça üretim maliyetinin tespit edilebilmesi için kesme parametrelerinin kesme kuvveti üzerindeki etkisinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sayede, gerekli gücün tespit edilebilmesi ve tezgâhın doğru boyutlandırılması gibi önemli işlemler gerçekleştirilebilmektedir. Kuvvet ve zorlanma etkisiyle oluşan gerilmeler iyi analiz edilirse, üretim kalitesinin artırabilmesi ve tezgâhların uzun ömürlü olabilmesi mümkün olabilmektedir. [1].

Talaş kaldırmada, en yüksek üretim miktarı hedeflenirken, bunun en düşük maliyetle gerçekleştirilmesi amaçlanır. Bu ise kesme kuvvetlerinin minimize edilmesiyle sağlanabilir. Kesme kuvvetlerinin minimize edilmesi, kesme parametrelerinin optimize edilmesine bağlıdır. Son yıllarda akademik ve ticari sahada, tornalamada parametre optimizasyonu üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Literatürde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisini inceleyen bazı çalışmalar hakkında kısa bilgiler şu şekildedir; Abou-El-Hossein v.d. [2], AISI P20 çeliği üzerinde yaptıkları çalışmada kuvvet tahmini için bir çalışma gerçekleştirdiler. Yapılan ANOVA analizi sonuçları incelendiğinde, ilerleme ve talaş derinliğinin kesme kuvveti üzerindeki en etkili parametreler olduğu tespit edilmiştir. Zhao v.d. [3] minimum kesme kuvvetini elde etmek için sezgisel optimizasyona dayalı bir çözüm önerdiler. Araştırmacılar, parçacık sürü optimizasyonu algoritması ile tornalamada ilerleme oranı ve devir sayısı kombinasyonunu optimize ettiler. Wang v.d. [4] F91 çeliği üzerinde deneyler yaptılar. Bu çalışmada kesme parametrelerinin, kesme kuvvetleri üzerine olan etkileri incelenmiş ve yazarlar kuvvet tahminine yönelik üssel bir fonksiyon geliştirdiler. Sonuç olarak, düşük kuvvet değerlerinin, düşük takım aşınmalarına ve daha yüksek talaş kaldırma oranına sebep olduğu vurgulanmıştır. Çalışkan v.d. [5] çalışmalarında ilerleme oranı, kesme hızı, talaş derinliği ve kesici takım kaplamasının yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti üzerine etkilerini araştırdılar. Yaptıkları

deneylerde L27 Taguchi deneysel tasarım yöntemini kullandılar. RSM yöntemini kullanarak süreci optimize ettiler. Aggarwal v.d. [6] AISI P-20 takım çeliğinin tornalanmasında, sıvı nitrojen kullanarak, yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi, kesme kuvveti ve takım ömrü tüketimini optimize ettiler. Yöntem olarak RSM yöntemini kullandılar. Bouacha v.d. [7] AISI 52100 çeliğini Kübik Bor Nitrür (CBN) ile tornalayarak, parça sertliğinin değişimi ve kesme hızına karşı kesme kuvvetleri ve takım aşınması değişimini incelediler. Yapılan deneyler sonucunda kesme hızı ve ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli parametreler olduğunu tespit ettiler. Devillez v.d. [8] kuru talaşlı imalatın yüzey bütünlüğü (integrity) üzerindeki etkisini ve Inconel 718 alaşımının tornalanmasındaki kesme kuvvetlerini araştırmıştır. Islak ve kuru tornalama testleri, kaplanmış karbür takımı ile çeşitli kesme hızlarında gerçekleştirilmiştir (0.5 mm kesme derinliği ve 0.1 mm/devir ilerleme hızı). Malagi v.d. [9] tornalamada kesme kuvvetlerini etkileyen faktörleri araştırmış ve ilerleme hızı ile kesme derinliği arttıkça kesme kuvvetinin de arttığını belirtmiştir. Gök [10] kesme kuvvetlerini ve yüzey pürüzlülüğünü minimize etmek için fuzzy TOPSIS and grey relational analysis yöntemlerini kullanmış ve çalışma kapsamında kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği parametrelerinin sonuçlar üzerindeki etkisi değerlendirmiştir.

Çalışmamızda, tornalamada kesme parametrelerinin kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüklerine yönelik etkileri araştırılmıştır. Kuvvet tahmini ve uygun parametre değerlerinin tespiti için optimum kesme parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Literatür incelendiğinde, tornalama operasyonlarında parametre optimizasyonunun büyük önem taşıdığı görülmektedir. Bu da bu alana olan ilginin artmasına neden olmaktadır. Bu amaçtan yola çıkarak yapılan bu çalışma, endüstride maliyet kaybını ve imalat zamanını minimize etmek amacıyla tornalama operasyonunun optimizasyonunu hedeflemektedir. Literatürde kullanılan malzemelerden farklı olarak ASTM B574 (Hastelloy C-22) malzemesi üzerinde deneyler yapılmıştır. Literatürdeki çalışmalarda daha çok kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğinin sonuçlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca bu çalışmalarda kesici takım geometrisinin çok fazla değerlendirilmediği belirlenmiştir. Bu çalışmada sonuçlara etki eden parametre sayısı arttırılmıştır. Kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliğine ek olarak soğutma sıvısı (MQL) debisi (flow), talaş açısı ve

yanaşma açısı parametrelerinin de sonuçlara etkisi araştırılmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. İşleme Koşulları ve Kesme Kuvvetleri

Gerçekleştirilen deneysel çalışmada iş parçası malzemesi olarak yüzey merkezli kübik yapıda, nikel bazlı ve korozyona dirençli bir Nikel-Krom-Molibden alaşım olan Hastelloy C22 malzemesi kullanılmıştır. Bir süper-alaşım olan Hastelloy C22, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini koruması ve erozyon direncinin yüksek olması nedeniyle roket kapaklarında yaygın şekilde kullanılır. Bu alaşım, yüksek sıcaklık dayanımı sebebiyle uçak türbin motorları ve süper turbo yükleyicilerinin üretiminde [11], gaz türbinlerinde ve savunma sanayinde tercih edilmektedir. Deneysel olarak kullanılan ASTM B574 (Hastelloy C-22) malzemesinin kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. ASTM B574 (Hastelloy C-22) kimyasal özellikleri;

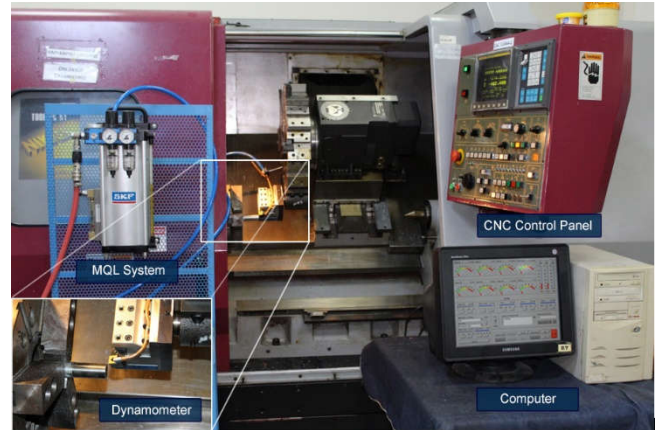
P	<0.005
S	<0.0003
Fe	5.2
C	0.004
Mn	<0.02
Mo	12.8
Cr	22.07
Si	<0.05
Al	0.18
Ti	<0.02
Ni	56.4
Co	0.13

Deneysel olarak kullanılan malzemenin boyutları 200x50 mm olup, CNC torna tezgâhına 50 mm boyunda bağlanmış, 30 mm tornalama boyunda işlenmiştir. Deneysel olarak kullanılan ASTM B574 (Hastelloy C-22) malzemesi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. ASTM B574 (Hastelloy C-22) malzemesi

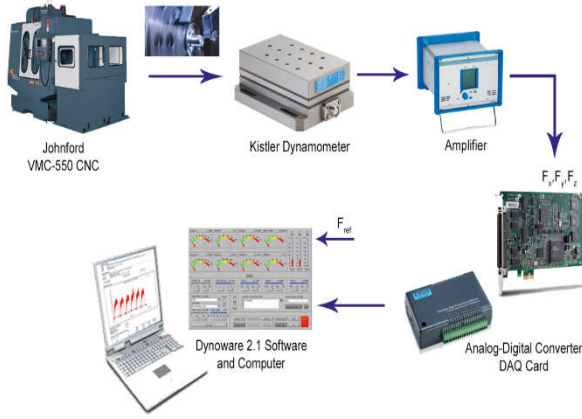
Deneysel olarak Johnford TC 35 CNC Fanuc OT X-Z eksenli tezgâh kullanılmıştır. MQL sisteminde SKF firmasının Vario model MQL cihazı tercih edilmiştir. Kullanılan sistem metal gövdeli, 1.8 litre yağ kapasitesine sahip olup, 3 çıkışıdır. Sistemde MQL sıvısı olarak Lubrioil (Asit Bazlı Ester) kullanılmıştır. Kuvvet ölçümü için KISTLER 5019b tipi yük amplifikatörü, KISTLER 9121 kuvvet sensörü ve DynoWare analiz programı kullanılmıştır. Deneysel düzeneği Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. Deneysel Düzeneği

Hazırlanan iş parçası malzemesi, özellikleri belirtilen CNC tezgâhında işlenerek yüzey pürüzlüğü (R_a) ve sıcaklık (T) verileri elde edilmiştir. Ölçümler için gerekli işlem adımları Şekil 3'de sunulmuştur.

G. Basmacı ve diğ. /Karma Taguchi ve yüzey yanıt yöntemi kullanılarak astm b574 (hastelloy c-22)'in tormalanması esnasındaki işleme parametrelerinin yüzey...



Şekil 3. Yüzey Pürüzlüğü ve Sıcaklık Değerlerinin Bilgisayar Yardımı ile Ölçümü

Kesme parametrelerinin değerleri, üretici firma kataloğuna uygun olarak saptanmıştır. Tablo 2’de sunulan kesme parametreleriyle deneyler yapılmış ve üç farklı eksendeki kesme kuvvetleri hesaplanmıştır. Bu çalışmada tormalama deneyleri için talaş açısı faktörleri 2 farklı seviyede, ilerleme, kesme hızı, debi, talaş derinliği ve yanaşma açısı faktörleri 3 farklı seviyede belirlenmiştir.

Tablo 2. Tormalama Parametreleri ve Seviyeleri

Sembol	Faktörler	Birim	Seviye		
			1	2	3
r_α	Talaş açısı	açı (°)	15	16	.....
v	Kesme Hızı	m/min.	60	80	100
f	İlerleme Oranı	mm/dev.	0.1	0.2	0.3
d	Kesme Derinliği	mm	0.1	0.3	0.5
f_0	Debi	ml/h	40	50	60
l_α	Yanaşma Açısı	açı (°)	55	75	90
t_d	Kesici Uç Çapı	mm	0.4	0.8	.....

2.2. Tepki Yüzeyi Metodolojisi (RSM)

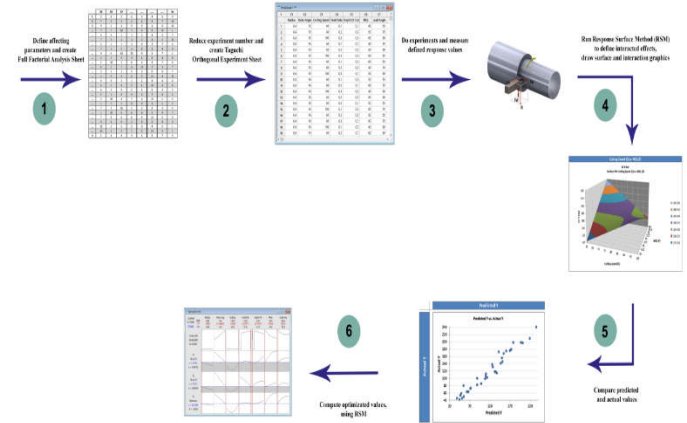
RSM, bir kesme sisteminde giriş parametrelerinin optimizasyonu için kullanılan bir matematiksel modelleme yöntemidir. Bu yöntem uygun deneysel tasarımdan elde edilen nicel veriler ile çok faktörlü modellerin oluşturulması ve benzer şekilde çözümlenmesinde kullanılır. Cevap yüzeyi olarak grafik şeklinde sunulabilen bu modeller; farklı faktörlerin cevabı nasıl etkilediğinin belirlenmesinde, değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamakta ve cevap yüzeyinin tüm faktörlerinin birleşik etkisini ortaya çıkarmakta kullanılır. Genel olarak RSM yöntemi üç aşamalı olarak gerçekleştirilmektedir. İlk aşamada bir deneysel parametre kombinasyonu oluşturularak, tepki değerlerinin elde edilebilmesi için fiziksel deneyler

gerçekleştirilmektedir. Bu şekilde geleneksel yöntemlerle karşılaştırıldığında, daha az ve verimli deneyler yapılarak maliyetlerin azaltılması sağlanmaktadır. Oluşturulan matematiksel modelin getirdiği en önemli katkılardan birisi de ara tepki değerlerinin hızlı bir şekilde belirlenmesidir. Sonraki aşamada, oluşan tepki değerlerinin giriş parametreleri ile olan ilişkisi üssel bir fonksiyon şeklinde tanımlanmaktadır. Son aşamada ise varyans analizi ve yüzey grafikleri gibi yöntemlerle uygun noktaların tespit edilmesi gerçekleştirilmektedir.

RSM problemlerinde giriş ve çıkış parametreleri arasındaki ilişki genellikle Denklem 1’de sunulan ikinci dereceden polinomsal bir denklem kullanılarak ifade edilmektedir [12]:

$$\eta = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_i \sum_j \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Burada η tahmin edilen tepkiler (R_a ve T); β_0 sabit bir katsayı; β_i , β_{ii} ve β_{ij} birinci ve ikinci dereceden kodlanan giriş parametreleri ve parametre etkileşim katsayılarıdır. Bu çalışmada yapılan RSM optimizasyon çalışması ve bu çalışmada izlenen yol Şekil 4’de sunulmuştur [2].



Şekil 4. RSM Akış Diyagramı

2.3. Deney Tasarımı

Bu çalışmada ASTM B574 (Hastelloy C-22) malzemesinden tormalama yöntemi ile talaş kaldırılmıştır. Talaş açısı, kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği, debi ve yanaşma açıları değerlerinin yüzey pürüzlüğü ve sıcaklık üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu incelemelerin tasarımında literatürde çokça kullanılan Taguchi optimizasyon metodu kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, optimizasyon ve parametrik analiz çalışmalarında maliyeti düşürmek, sonuçlara daha az sayıda deney yaparak kısa sürede ulaşmak ve parametrelerin

hedef sonuç üzerindeki etkilerini belirlemek için tam faktoriyel deney tasarımına alternatif olarak geliştirilmiş güçlü bir yöntemdir [13]. Bu çalışmada 6 parametre ve her parametre için 3 seviye belirlendi. L₃₆ Taguchi deney tasarımının kullanılması ile toplam 36 deney gerçekleştirildi. Tablo 2’de seçilen faktör ve seviyelerine göre L₃₆ karışık seviye deney tasarımı görülmektedir. Bu faktör ve seviyelere göre hazırlanan deney tasarımı, çalışma sisteminin temelini oluşturmaktadır. Tabloda verilen parametre değerlerine göre elde edilen kuvvet ölçüm değerleri de sunulmuştur. Bu düzene göre yapılan deneyler 3’er defa tekrar edilerek elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

3. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Model Oluşturulması

Bu çalışmada, kesme parametrelerinin etkisi altında kesme kuvvetlerinin tahmini için RSM tabanlı quadratic modeller geliştirilmiştir. Verilerin analizi için Statistica 10 (StatSoft Inc., Oklahoma, USA) yazılımı kullanılmıştır. Parametreler ve elde edilen tepki değerleri ile 2. dereceden polinomsal bir tepki tahmin fonksiyonu oluşturuldu. Her tepki için elde edilen tahmin eşitlikleri Tablo 4’de sunulmuştur.

Tablo 3. Kesme Koşulları Taguchi ortogonal deney tasarımı L36 Ortogonal index (Mixed Level Design)

Radius (mm)	Talaş Açısı (°)	Kesme Hızı (m/min)	İlerleme Oranı (mm/dev)	Talaş Derinliği (mm)	Debi (mm/h)	Lead Angle
0.4	15	60	0.1	0.1	40	55
0.4	15	80	0.2	0.3	50	75
0.4	15	100	0.3	0.5	60	90
0.4	15	60	0.1	0.1	40	75
0.4	15	80	0.2	0.3	50	90
0.4	15	100	0.3	0.5	60	55
0.4	15	60	0.1	0.3	60	55
0.4	15	80	0.2	0.5	40	75
0.4	15	100	0.3	0.1	50	90
0.4	16	60	0.1	0.5	50	55
0.4	16	80	0.2	0.1	60	75
0.4	16	100	0.3	0.3	40	90
0.4	16	60	0.2	0.5	40	90
0.4	16	80	0.3	0.1	50	55
0.4	16	100	0.1	0.3	60	75
0.4	16	60	0.2	0.5	50	55
0.4	16	80	0.3	0.1	60	75
0.4	16	100	0.1	0.3	40	90
0.8	15	60	0.2	0.1	60	90
0.8	15	80	0.3	0.3	40	55
0.8	15	100	0.1	0.5	50	75
0.8	15	60	0.2	0.3	60	90
0.8	15	80	0.3	0.5	40	55
0.8	15	100	0.1	0.1	50	75
0.8	15	60	0.3	0.3	40	75
0.8	15	80	0.1	0.5	50	90
0.8	15	100	0.2	0.1	60	55
0.8	16	60	0.3	0.3	50	75
0.8	16	80	0.1	0.5	60	90
0.8	16	100	0.2	0.1	40	55
0.8	16	60	0.3	0.1	50	75
0.8	16	80	0.1	0.3	60	90
0.8	16	100	0.2	0.5	40	55

Tablo 4. Regresyon Modeli ve R² Değerleri

Yüzey Pürüzlüğü	F ₀	F ₁	F ₂	F ₃	R ²
Regresyon modelleri	45	50	105		
Yüzey Pürüzlüğü	45	16	39		93.85%
	117	52	46		
	240	105	341		
	175	140	281		
	167	93	203		
	178	51	79		
	155	136	99		
	79	32	77		
	131	44	178		
	111	55	181		
	49	5	45		
	98	61	92		
	145	77	174		
	82	30	83		
	73	35	92		
	58	8	57		
	41	13	33		
	197	133	174		
	106	29	121		
	102	8	101		
	71	25	58		
	174	52	195		
	117	35	136		
	43	11	43		
	196	76	263		

Tablo 4 incelendiğinde, kuvvetlere ait regresyon denklemlerinin tahmin yeteneklerini gösteren R² değerinin %90’dan daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu grafiklerdeki noktalar, tahmin değerlerini gösterir. Bu noktaların grafikteki doğrusal çizgiye olan mesafesi ise gözlenen değerlerin beklenen değerlere uyumunu göstermektedir.

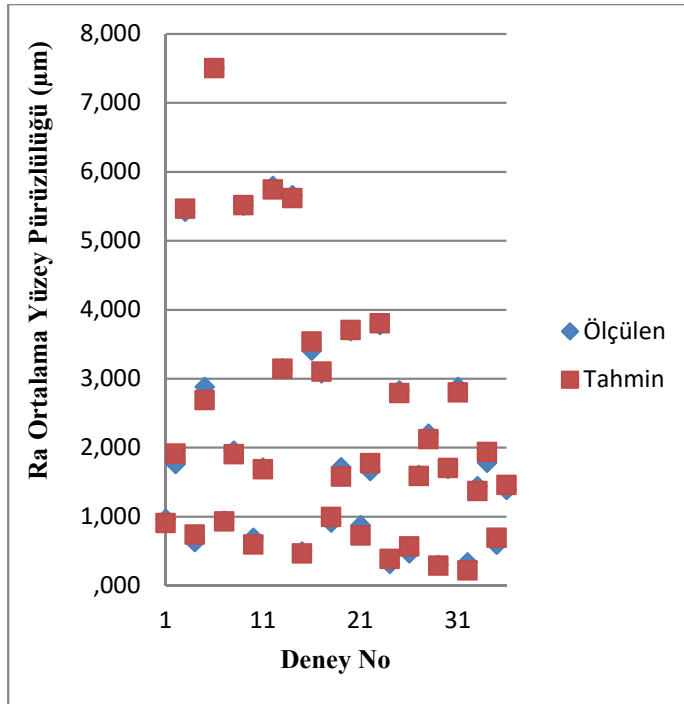
Tornalama işleminde kullanılan bağımsız değişkenler (kesici takım uç radiusu, talaş açısı, kesme hızı, devir başına ilerleme, kesme derinliği, debi, yanalma açısı) ile bağımlı değişken (R_a Ortalama Yüzey Pürüzlüğü) arasında tahmini

denklem oluşturma ve bunlar arasındaki ilişkiyi tanımlayabilmek için regresyon analizi kullanılmıştır. Talaş kaldırma deneyleri neticesinde oluşan Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü (R_a) ait matematiksel model elde edilirken; kesici takım uç radiusü (r), talaş açısı (α), kesme hızı (v), devir başına ilerleme (f), kesme derinliği (a), debi (d), yanaşma açısı (q) ya bağlı olarak ikinci dereceden regresyon modeli:

$$R_a = k_0 + k_1 * r + k_2 * \alpha + k_3 * v + k_4 * f + k_5 * a + k_6 * d + k_7 * q + k_8 * v^2 + k_9 * f^2 + k_{10} * a^2 + k_{11} * d^2 + k_{12} * q^2 + k_{13} * r * \alpha + k_{14} * r * v + k_{15} * r * f + k_{16} * r * a + k_{17} * r * d + k_{18} * r * q + k_{19} * \alpha * v + k_{20} * \alpha * f + k_{21} * \alpha * a + k_{22} * \alpha * d + k_{23} * \alpha * q + k_{24} * v * f + k_{25} * v * a + k_{26} * v * d + k_{27} * v * q + k_{28} * f * a + k_{29} * f * d + k_{30} * f * q + k_{31} * a * d + k_{32} * a * q + k_{33} * d * q$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemdeki sabit katsayılar Minitab R16 paket programı yardımıyla yanıt yüzey (response surface) metodu kullanılarak elde edilmiştir.

Şekil 6'da ortalama yüzey pürüzlülüğünü modellendiğimizde ise korelasyon katsayısı %93.85 olarak elde edilmiştir. Bu değerlerin %85 üzerinde çıkması modellerin uygun ve kullanılabilir olduklarını göstermektedir.



Şekil 6. Deneysel ve Teorik R_a Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü Verilerinin Karşılaştırılması

3.2. Varyans Analizi (ANOVA)

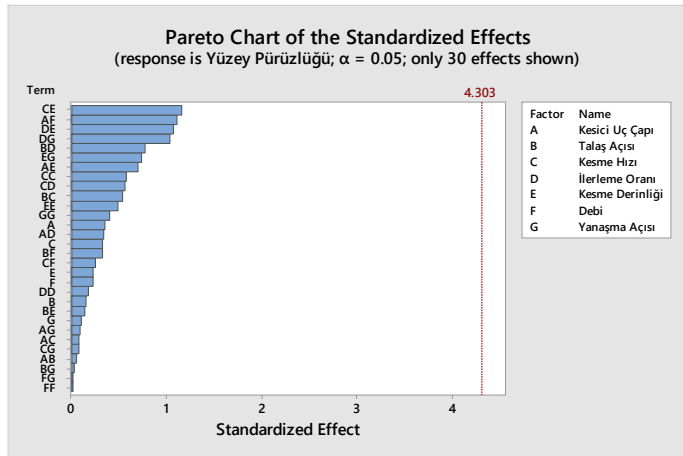
İşleme etki eden faktörlerin performansları arasındaki farklılığı ortaya koymak için istatistiğe dayalı bir karar aracı olan varyans analizleri (The Analysis of variance, ANOVA) yapılmıştır. Varyans analizi, bağımsız değişken ya da değişkenlerin farklı değerlerinin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla uygulanmaktadır. Tablo 5'de, yüzey pürüzlülüğü için ANOVA analizlerinin sonuçları verilmiştir. ANOVA analizinde bir parametre veya etkileşimin tepki üzerindeki etkisi P (önem/olasılık) değerine bakılarak anlaşılmaktadır. %95 güven aralığında yani $P < 0.05$ olduğunda parametrenin tepki üzerinde etkili olduğu sonucu elde edilir. Buna göre hiçbir parametre tek başına bir önem arz etmemektedir. Bunu yerine parametreler arasındaki ikili etkileşimlerin daha belirleyici olduğu görülmektedir.

Tablo 5. ANOVA Sonuçları R_a Yüzey Pürüzlülüğü

Kaynak	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	33	401017	12152.0	0.93	0.649
Linear	7	10298	1471.2	0.11	0.988
Kesici Uç Çapı	1	1621	1620.5	0.12	0.759
Talaş Açısı	1	296	296.4	0.02	0.894
Kesme Hızı	1	1394	1394.3	0.11	0.776
İlerleme Oranı	1	1	1.5	0.00	0.992
Kesme Derinliği	1	716	716.0	0.05	0.837
Debi	1	711	710.8	0.05	0.838
Yanaşma Açısı	1	152	152.1	0.01	0.924
Square	5	21379	4275.8	0.33	0.865
Kesme	1	4366	4365.9	0.33	0.623
Hızı*Kesme Hızı					
İlerleme Oranı*İlerleme Oranı	1	420	419.7	0.03	0.875
Kesme Derinliği*Kesme Derinliği	1	3090	3090.3	0.24	0.676
Debi*Debi	1	2	2.1	0.00	0.991
Yanaşma Açısı*Yanaşma Açısı	1	2119	2118.7	0.16	0.727
2-Way Interaction	21	231998	11047.5	0.84	0.676
Kesici Uç Çapı*Yanaşma Açısı	1	42	42.0	0.00	0.960
Kesici Uç Çapı*Kesme Hızı	1	84	83.6	0.01	0.944
Kesici Uç Çapı*İlerleme Oranı	1	1521	1520.6	0.12	0.766

Kesici Uç Çapı	Uç	1	6353	6352.9	0.48	0.559
Çapı*Kesme Derinliği	Uç	1	15985	15984.6	1.22	0.385
Çapı*Debi	Uç	1	110	110.0	0.01	0.935
Çapı*Yanaşma Açısı						
Talaş		1	3881	3881.2	0.30	0.641
Açısı*Kesme Hızı						
Talaş		1	7771	7770.9	0.59	0.522
Açısı*İlerleme Oranı						
Talaş		1	272	271.7	0.02	0.899
Açısı*Kesme Derinliği						
Talaş Açısı*Debi		1	1383	1383.5	0.11	0.776
Talaş		1	11	10.9	0.00	0.980
Açısı*Yanaşma Açısı						
Kesme		1	4244	4244.1	0.32	0.627
Hızı*İlerleme Oranı						
Kesme		1	17761	17761.2	1.35	0.365
Hızı*Kesme Derinliği						
Kesme Hızı*Debi		1	876	876.5	0.07	0.820
Kesme		1	81	81.1	0.01	0.945
Hızı*Yanaşma Açısı						
Hata		2	26273	13136.5		
Toplam		35	427290			

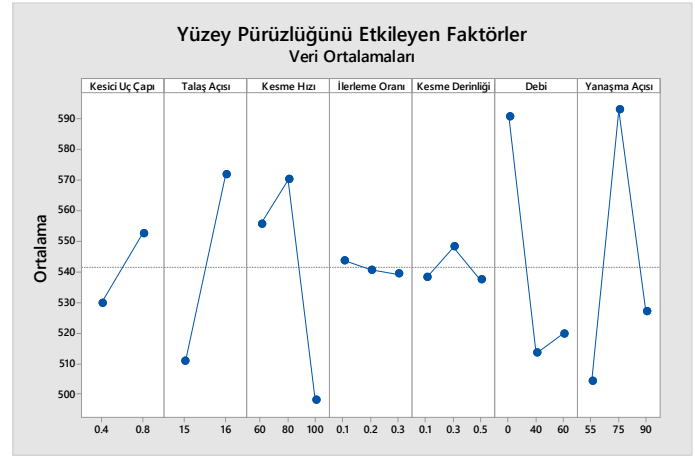
Şekil 7'de ortalama yüzey pürüzlülüğü değerini etkileyen parametre çiftleri için oluşturulmuş olan pareto grafiği yer almaktadır. Bu grafiğe bakıldığında en önemli etken çiftinin Kesme hızı ve kesme derinliği olduğu görülmektedir. Bunun ardından ise Kesici uç çapı ile kesme derinliği faktörlerinin bileşimi önemli rol oynamaktadır. Tek başına faktörlerin etkisi ikili faktör seviyelerine göre daha düşük değerlerde kalmaktadır.



Şekil 7. Ra Ortalama Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Parametreler İçin Pareto Grafiği

Yüzey pürüzlülüğünü etkileyen faktörlerin almış oldukları değerlere göre etki dereceleri ise Şekil 8'de detaylı olarak verilmiştir. Buna göre

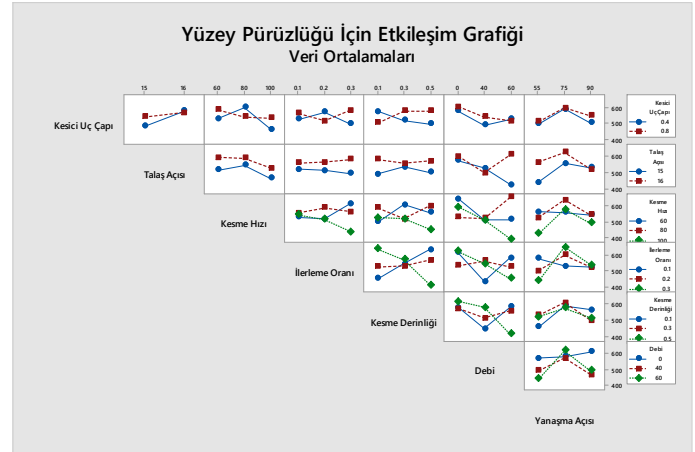
parametre aralığına göre yüzey pürüzlülüğü oranı en yüksek olan faktör yanaşma açısı, kesme hızı ve debi olarak görülmektedir.



Şekil 8. Ra Ortalama Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Parametrelerin Değerleri ve Etkinlik Dereceleri

Kesici uç çapı, talaş açısı ve ilerleme oranı ile yüzey pürüzlülüğü ortalama değeri arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Kesme açısı, debi, yanaşma açısı faktörleri içinse bir uygun değer hesaplaması gerekmektedir.

Şekil 9'da ise veri ortalamalarına göre faktörlerin birbirleri ile olan etkileşimleri hesaplanarak grafiksel olarak ifade edilmiştir.



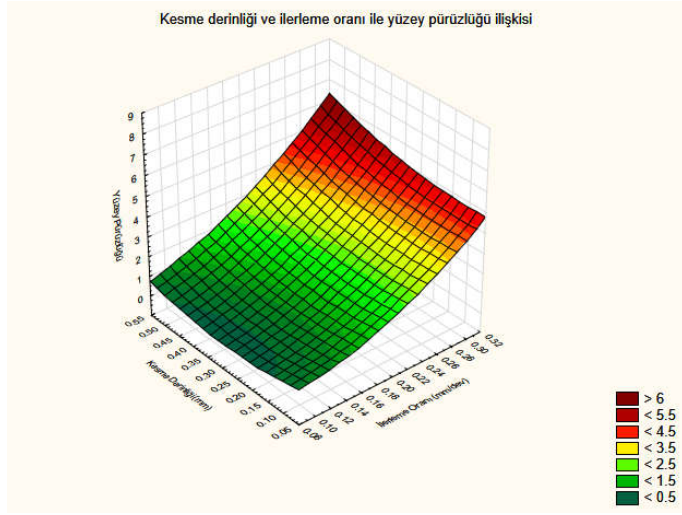
Şekil 9. Ra Ortalama Yüzey Pürüzlülüğünü Etkileyen Parametrelerin Etkileşim Grafiği

3.3. Yüzey Grafikleri ve Analizi

3B yüzey grafikleri, elde edilen regresyon denklemlerine bağlı olarak çizdirilir. Bu grafikler sayesinde deney parametrelerinin tepkiler üzerindeki etkisi ve en uygun parametre kombinasyonları anlaşılacaktır. Bu grafiklerde hedeflenen en uygun noktalar, grafiklerdeki parametre etkileşimine göre yüzey pürüzlülüğünün

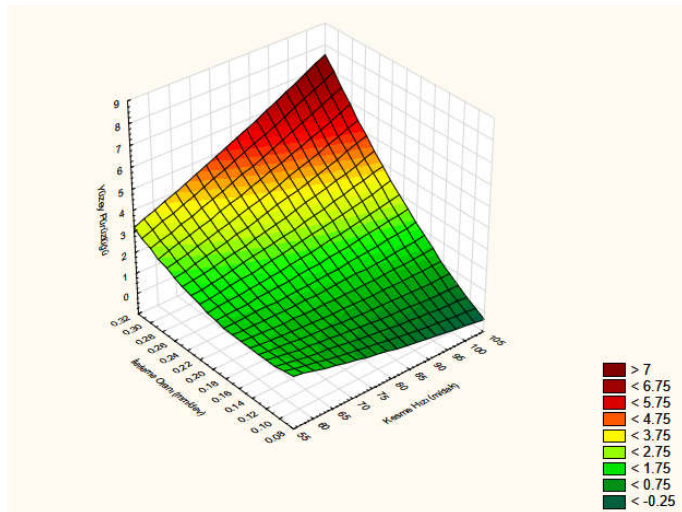
en düşük seviyede olduğu bölgelerin belirlenmesi ile elde edilecektir.

Şekil 10'da verilen grafik kesme derinliği ve ilerleme oranının ortalama yüzey pürüzlülüğüne etkisi verilmiştir. Buna göre ilerleme oranı değeri arttıkça yüzey pürüzlüğünün de buna bağlı olarak yükseldiği görülmektedir. Kesme derinliğinin artması da yüzey pürüzlüğünü artırmış ancak bu artış ilerleme hızı parametresi kadar etkili olmamıştır.



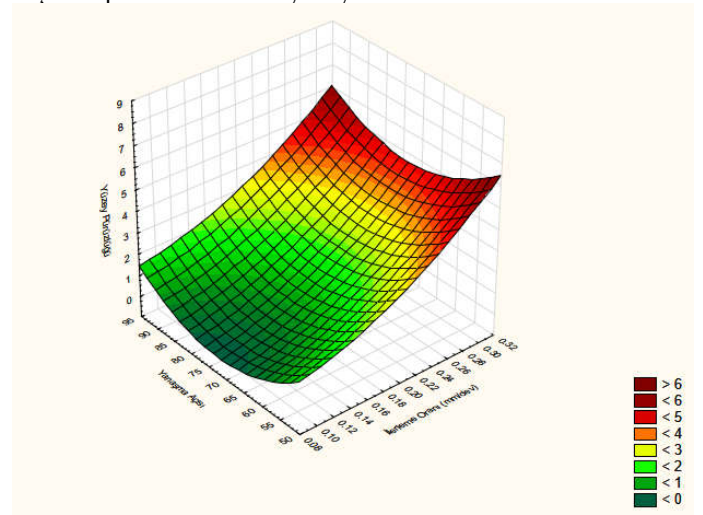
Şekil 10. Kesme Derinliği ve İlerleme Oranının Yüzey Pürüzlüğüne Etki Grafiği

Şekil 11'de kesme hızı ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiş ve iki parametrenin de yüzey pürüzlüğünün artması noktasında etkili olduğu görülmüştür.



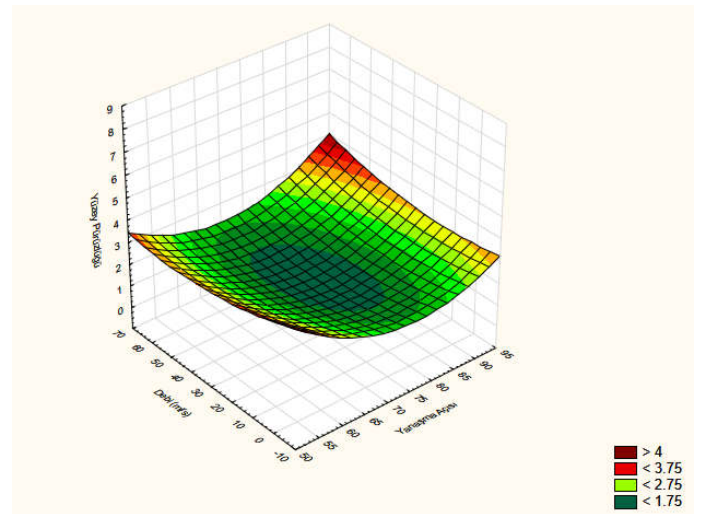
Şekil 11. Kesme Hızı ve İlerleme Oranının Yüzey Pürüzlüğüne Etki Grafiği

Şekil 12'de yanaşma açısı ile ilerleme oranı faktörleri yüzey pürüzlülüğü açısından incelenmiş ve ilerleme oranını etkili bir parametre olduğu tespit edilmiştir.



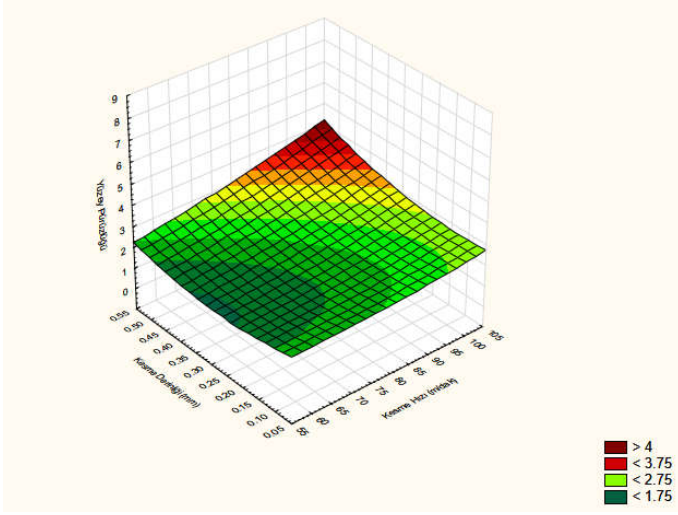
Şekil 12. Yanaşma Açısı ve İlerleme Oranının Yüzey Pürüzlüğüne Etki Grafiği

Şekil 13'de yanaşma açısı ile debi faktörleri yüzey pürüzlülüğü açısından incelenmiş ve her iki parametrenin de orta seviyelerinin yüzey pürüzlüğü değerinin endüşük olduğu noktalar olduğu tespit edilmiştir.



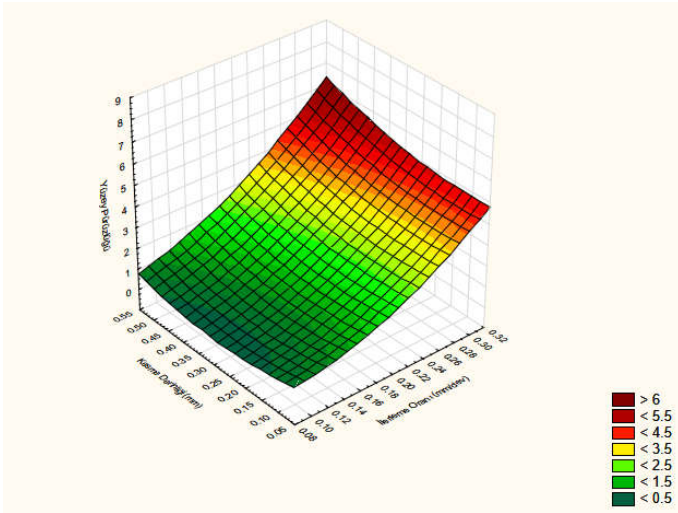
Şekil 13. Debi ve Yanaşma Açısının Yüzey Pürüzlüğüne Etki Grafiği

Şekil 14'de kesme hızı ve kesme derinliği ilişkisi incelendiğinde faktörlerin birbirlerini etkilediği yüksek değerlerin daha fazla yüzey pürüzlüğüne sebep olduğu görülmektedir.



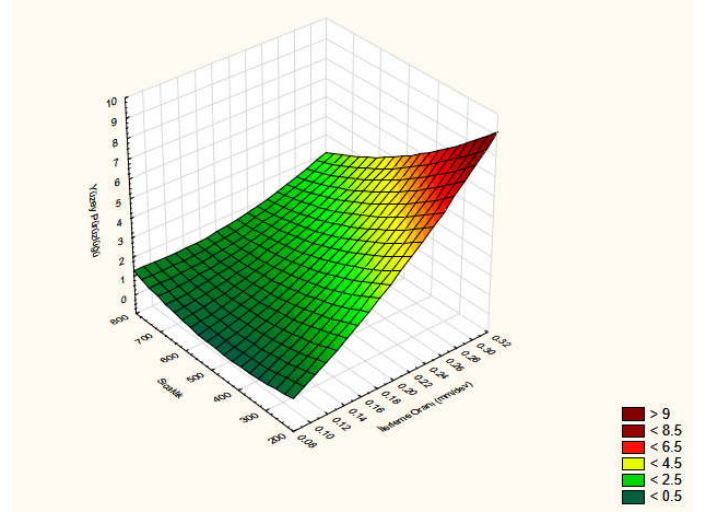
Şekil 14. Kesme Hızı ve Kesme Derinliğinin Yüzey Pürüzlüğüne Etki Grafiği

Kesme derinliği ve ilerleme oranı faktörlerinin etkisi Şekil 15’de incelenmiş ve ilerleme oranını belirgin şekilde yüzey pürüzlüğünü artırdığı görülmüştür.

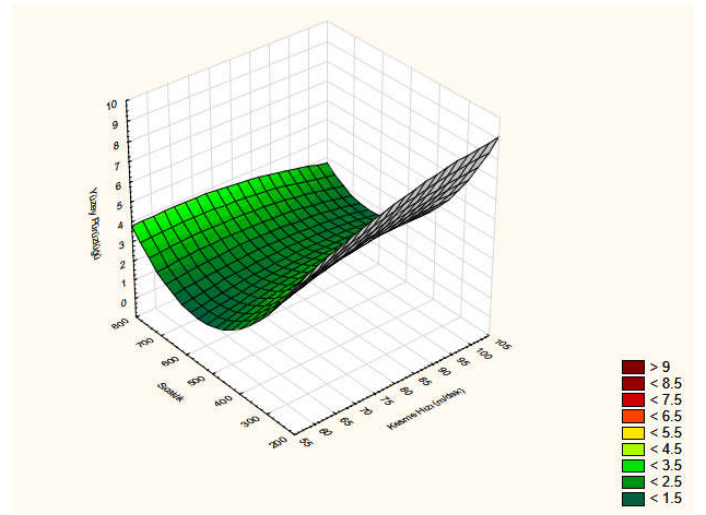


Şekil 15. Kesme Derinliği ve İlerleme Oranının Yüzey Pürüzlüğüne Etki Grafiği

Şekil 16’da sıcaklık ve ilerleme oranı ilişki grafiği verilmişken Şekil 17’de de sıcaklık ve kesme hızının yüzey pürüzlüğüne etkisi gösterilmiştir. Buna göre sıcaklık ile yüzey pürüzlüğü arasında doğrusal olmayan bir ilişki söz konusudur.

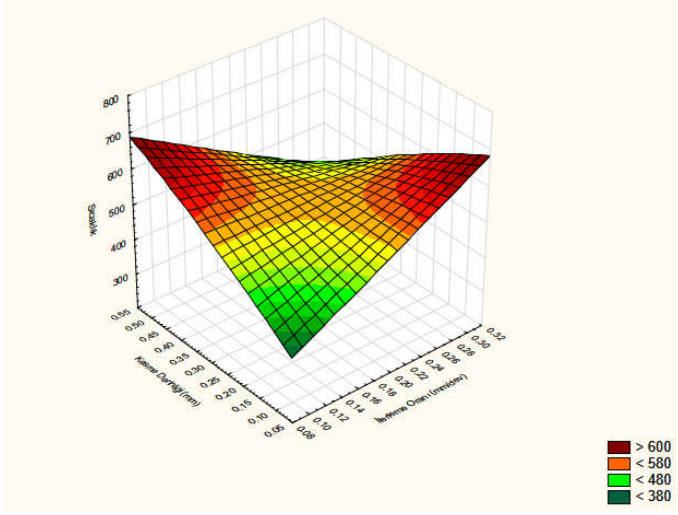


Şekil 16. Sıcaklık ve İlerleme Oranının Yüzey Pürüzlüğüne Etki Grafiği



Şekil 17. Sıcaklık ve Kesme Hızının Yüzey Pürüzlüğüne Etki Grafiği

Şekil 18’de sıcaklık, kesme derinliği ve ilerleme oranı etkileşimi 3 boyutlu grafik şeklinde verilmiştir. Grafikte ilerleme oranı ve kesme derinliği arttıkça sıcaklık değerinin doğrusal olarak arttığı görülmektedir.



Şekil 18. Sıcaklık, Kesme Derinliği ve İlerleme Oranı Etkileşim Grafiği

3.4. Parametre Optimizasyonu

Bu çalışmanın son aşamasında parametre optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon için belirlenen kriterler dikkate alınarak oluşturulan optimizasyon tablosu Tablo 6'da sunulmuştur. Hedef olarak, yüzey pürüzlüğünün minimize edilmesi belirlenmiştir.

Tablo 6. RSM metoduna göre parametre optimizasyonu

Kesici uç Çapı	Talaş Açısı	Kesme Hızı	İlerleme Oranı	Kesme Derinliği	Debi	Yanaşma Açısı
0.4	16	100	0.2	0.3	60	75

Tabloda da görüldüğü gibi, en düşük yüzey pürüzlüğü değerinin elde edilmesi için için en ideal parametre kombinasyonu $t_d=0.4$ mm, $r_\alpha=16^\circ$, $v=100$ m/min, $f=0.2$ mm/dev, $d=0.3$ mm, $f_0=60$ ml/h ve $l_\alpha=75^\circ$ olarak bulunmuştur.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada ASTM B574 (Hastelloy C-22) malzemesi üzerinde tornalama işleminde kesme kuvvetlerinin minimizasyonu için gerekli olan parametre kombinasyonunun tespiti amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın dikkat çeken sonuçları aşağıda listelenmiştir;

Uygulanan RSM yöntemiyle etkili sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen regresyon denklemlerinin geçerliliği R^2 oranlarına bağlı olarak ($R_a=0.93.85$) son derece yüksek bulunmuştur. Sonuçlar aynı zamanda tahmin grafikleri ile de sunulmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde regresyon, ANOVA ve yüzey grafikleri sonuçlarının birbirleri ile tutarlı olduğu görülmektedir. Benzer çalışmalar için de bu yöntemin güvenle kullanılabileceği öngörülmektedir.



Hastelloy C-22 malzemesinin işlenmesi ile çok düşük ortalama pürüzlülük değerlerine ulaşıldığı ve daha sonra herhangi bir işleme gerek kalmayacak şekilde yüzey kalitesi elde edildiği belirlenmiştir.

REFERENCES

- [1] N. Z. Yussefian, A. Hosseini, K. Hosseinkhani And H. A. Kishawy, "Design For Manufacturing Of Variable Microgeometry Cutting Tools," *Journal Manufacturing Science and Engineering*, vol. 1, pp. 15-17, 2017.
- [2] K. A Abou-El-Hossein, K. Kadrigama, M. Hamdi, And K. Y Benyounis, "Prediction of cutting force in end-milling operation of modified AISI P20 tool steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.182, pp. 241-247, 2007.
- [3] H. Zhao, J.G. Li, Y.X. Yao, and C.Q Liu, "Cutting Parameters Optimization for Constant Cutting Force in Milling," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 10, pp. 483-487, 2008.
- [4] Z.J. Wang, F.H. Sun, and G.W. Zhao, "Optimization of Cutting Force by Exponential Model in Milling Heat-Resistant Steel F91," *Advanced Materials Research*, vol. 397, pp. 53-54, 2008.
- [5] H. Çalışkan, C. Kurbanoglu, P. Panjan, ve D. Kramar, "Investigation of the performance of carbide cutting tools with hard coatings in hard milling based on the response surface methodology," *International Journal*

Advanced Manufacturing Technology, vol. 12,
pp. 170-174, 2012.

- [6] A. Aggarwal, H. Singh, P. Kumar, and M. Singh, "Optimizing power consumption for CNC turned parts using response surface methodology and Taguchi's technique-A comparative analysis," *Journal Materials Processing Technology*, vol. 200, pp. 373-384, 2008.
- [7] K. Bouacha, M. A. Yallese, T. Mabrouki, and J. F. Rigal, "Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool," *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, vol. 28, pp. 349-361, 2010.
- [8] A. Devillez, F. Schneider, S. Dominiak, D. Dudzinski, D. Larrouquere, "Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools," *Wear*, vol. 262, pp. 931-942, 2007.
- [9] R.R. Malagi and B.C. Rajesh, "Factors Influencing Cutting Forces in Turning and Development of Software to Estimate Cutting Forces in Turning," *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, vol. 2, pp. 37-43, 2012.
- [10] A. Gök, "A New Approach to Minimization of the Surface Roughness and Cutting Force via Fuzzy TOPSIS, Multi-Objective Grey Design and RSA," *Measurement*, vol. 70, pp. 100-109, 2015.
- [11] W. Betteridge, J. Heslop, "The Nimonic Alloys, and Other Nickel-Base High Temperature Alloys, Books, pp. 925-933. New York. 29, 1974.
- [12] İ. Asiltürk, S. Neşeli, and M. A. İnce, "Optimisation of parameters affecting surface roughness of Co28Cr6Mo medical material during CNC lathe machining by using the Taguchi and RSM methods," *Measurement*, vol.78, pp. 120-128, 2016.
- [13] G. Taguchi, E. Elsayed, T. Hsiang, "Quality Engineering in Production Systems", *McGraw-Hill*, Books, pp. 235-241. New York, 1989.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Gelis/Received</u> 20.11.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 26.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.356349	

Frenli tas menteşe kinematik, kinetik ve yorulma analizi

Meral Bayraktar*¹ Hidayet Bilyaz² Cihan Demir³

ÖZ

Bu çalışmada, mobilya sektöründe sıklıkla kullanılan menteşe çeşitlerinden düz frenli tas menteşelerin kinematik, statik ve yorulma analizleri yapılmıştır. Bu kapsamda menteşenin katı modellenmesi paket program kullanılarak yapılmıştır. Menteşe kinetik ve kinematik analizi, çok parçalı gövde analizi programı ile yapılmıştır. Bu analizden elde edilen yatak ve mafsal kuvvetleri kullanılarak, yapının sanki-statik analizi için sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Analizler TS EN 15570 standardı göz önüne alınarak yapılmıştır. Yorulma analizi değerlendirmeleri ile yapıda değişiklikler önerilmiştir. Sistem için, çok parçalı gövde analiz programı ile yapılan kinematik ve kinetik analiz sonuçlarının, sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve yorulma analizinde kullanılması, sonlu elemanlar programı geçici cevap analizine alternatif olarak gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: tas menteşe, kinematik analiz, kinetik analiz, sonlu elemanlar yöntemi

Kinematic, kinetic and fatigue analyses of cup hinge with brake

ABSTRACT

This paper presents kinematic, static and fatigue analyses of straight cup hinge with brake which is widely used in the furniture industry. The solid model of the hinge is created by using packaged programme. The kinetic and kinematic analyses of hinge are performed by use of multiple body analysis programme. The quasistatic analysis of the structure is made due to the support and joint forces which are obtained as a result of the kinetic and kinematic analyses. The analyses are carried out by considering the standard TS EN 15570. Related to the evaluation of fatigue analysis, modifications are proposed for the structure. The results of kinetic and kinematic analyses adopted to static and fatigue analyses due to finite element method is shown as an alternative to the transient response of the finite element method.

Keywords: cup hinge, kinematic analysis, kinetic analysis, finite element method

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

¹ Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul – mbarut@yildiz.edu.tr

² Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul – hbilyaz@gmail.com

³ Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul – cdemir@yildiz.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde evlerde, ofislerde ve eğitim kurumlarında kullanılan mobilyalar büyük çoğunlukla ahşap malzemelerden yapılmaktadırlar. Ahşap malzemeler, üretim ve montaj kolaylığından dolayı çelik, alüminyum ve plastik gibi diğer malzemelere nazaran daha çok tercih edilmektedirler. Masa, dolap ve kitaplık gibi mobilya parçalarında ergonomik bir tasarım oluşturmak için birleşimler yani bağlantı elemanları kullanılmaktadır. Bu bağlantı elemanları kullanılan yerin kullanım şekline göre değişiklikler gösterirler [1]. Bağlantı elemanları mekanik çektirme işlemi ile parçaları birbirine bağlayan, değişik boyutlarda, metal ya da plastik malzemeden üretilen mekanizmalardır [2]. Bu bağlantı gereçlerinden en önemlisi mobilya kapaklarını, kapı ve pencere kanatlarını açıp kapamada kullanılan menteşelerdir. Dekoratif bir görünüm vermelerinden dolayı menteşeler genellikle paslanmaz çelikten imal edilirler.

Gelişen mobilya sektörü menteşelerin tasarımında değişiklikleri de zorunlu bir hale getirmiştir. Plastik ve metal tas menteşeler bu yeni dönemde yaygın olarak kullanılan menteşelerdir. Düz, yarım deveboynu ve tam deveboynu olmak üzere farklı isimler alan (Şekil 1) bu menteşelerin açılı duran kapaklarda kullanılanları da vardır [3]. Tas menteşeler, kolay sökülüp takılabilmeleri gibi avantajlarından dolayı seri olarak yüksek miktarlarda üretilirler. Yaylı olarak üretildiklerinden çit çit kullanmaya gerek duyulmaz.



Şekil 1. Deveboynu ve tam deveboynu tas menteşe (Swan neck and full swan neck cup hinge) [3]

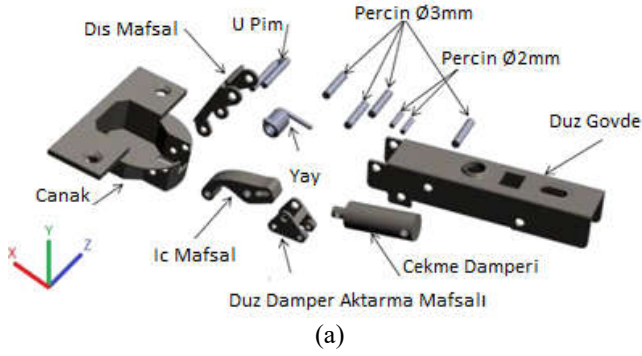
Liteatürde farklı alanlarda kullanılan menteşelerle ilgili çok sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin, uçak kanatlarında kullanılan metal menteşeler yerine termoplastik kompozit menteşelerin kullanılmasıyla ilgili yapılan deneysel çalışmada, farklı fiber açılara sahip menteşelerin daha yüksek yüklere dayanabildikleri rapor edilmiştir [4]. Otomotiv endüstrisinde, kapıların açılıp kapatılması esnasındaki konumları veyahut kaza

anlarındaki tepkileri nedeniyle menteşelerle ilgili yapılan çalışmada, menteşelerin statik ve dinamik koşullardaki test sonuçları uluslararası standartlarla karşılaştırılmıştır [5]. Otomobil kapı menteşelerinin yoğunlaşmış gerilme ve gerinim alanlarındaki kırılmayı tahmin etmek amacıyla, sürekli kırılma kriteri tanıtılmış ve sonlu elemanlar analizi ile menteşenin presle şekillendirilmesinde önemli bir faktör olan menteşe köşe çapı belirlenmiştir [6]. Dar alanlarda avantaj sağlayacak bagaj kapak mekanizmasının paralel menteşe sistemi olarak tasarlandığı çalışmada, tasarım dört-çubuk mekanizması kullanılarak modellenmiş ve kinematik analizi gerçekleştirilmiştir [7]. Menteşelerin montaj tolerans analizleri yapılarak pin ve silindirler arasındaki tipik hizalama hatalarını içeren bir analiz modeli geliştirilmiş ve montajın başarılı olmasını sağlayan Monte Carlo metodu ile simülasyonlar gerçekleştirilerek montaj hatalarına neden olan giriş değişkenleri ortaya konulmuştur [8]. Uçak ve otomotiv sanayilerinin dışında sıklıkla kullanılan mobilya sektörüne yönelik menteşelerle ilgili çalışmada Watt I altı-çubuk menteşesinin topolojik yapısı ve gerekli tasarım kriterleri gözönüne alınarak en uygun menteşe tasarımı elde edilmeye çalışılmıştır [9]. Bunun için Hamilton prensibi ve Tanımsız Lagrange Çarpanları ile hareket denklemleri elde edilerek Runge Kutta Metodu ile çözüm sağlanmıştır. Elektronik endüstrisinde kullanılan menteşelerle ilgili olarak bir dizüstü bilgisayara ait menteşenin gerilme analizi yapılarak sonuçlar yayınlanmıştır [10].

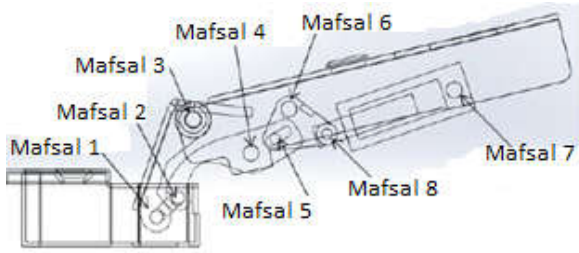
Bu çalışmada, menteşenin kinematik ve kinetik analizlerinden elde edilen yatak ve mafsalsal kuvvetleri ANSYS sonlu elemanlar programı kullanılarak, frenli tas bir menteşeye uygulanmış ve standartlara uygun olacak şekilde farklı yüklere maruz bırakılmıştır. Elde edilen sonuçlardan hareketle, burulma yayı sabiti belirlenmiş, fren görevi gören damper elemanının absorbe etmesi gereken enerji saptanmış ve aralarındaki enerji dönüşümüne göre damper elemanının sönüm ve yay değerleri bulunmuştur. Bildiğimiz kadarıyla, bu kapsamda tas menteşeler için literatürde kinematik, kinetik ve dinamik analiz çalışmaları bulunmamaktadır.

2. FRENLİ TAS MENTEŞE KATI MODEL VE MEKANİZMASI (THE SOLID MODEL AND MECHANISM OF CUP HINGE WITH BRAKE)

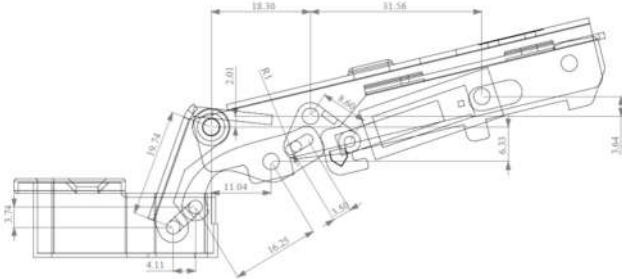
Analizlerde kullanılan tas menteşeye ait katı modelinin ayrıklaştırılmış hali, menteşenin mafsalları tanımlamaları ve mafsallar arası ölçüler Şekil 2’de gösterilmiştir [11].



(a)



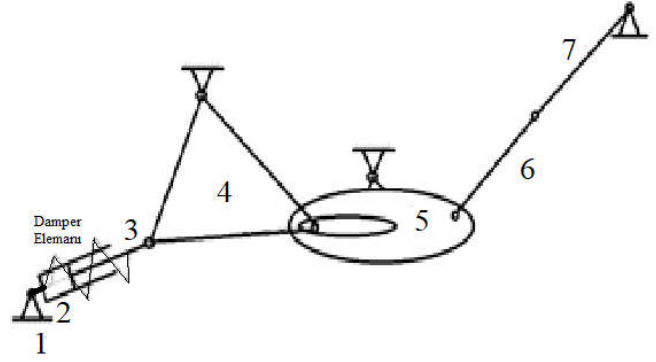
(b)



(c)

Şekil 2. Tas menteşenin katı modeli (a), mafsallar (b) ve mm cinsinden mafsallar arası mesafeler (c) (Solid model of cup hinge (a), joints (b) and the distance between the joints in mm (c))

Malzemesi AISI 1045 soğuk çekilmiş çelik olan tas menteşe mekanizmasını oluşturan elemanlar numaralandırılarak (Şekil 3), her bir elemana ait eleman çifti Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Tas menteşe mekanizması (Cup hinge mechanism)

Tablo 1. Menteşe mekanizmasındaki eleman çiftleri (Kinematic pairs of the hinge mechanism)

Eleman numarası	Eleman çifti
1	12, 14,15, 17
2	21, 23
3	32, 34
4	41, 43, (45) _{II}
5	51, (54) _{II} , 56
6	65, 67
7	76, 71

Zorunlu hareketli bir mekanizma olan tas menteşe eleman çiftinde n uzuv sayısının ($n=7$ adet), e_1 adi eleman ($e_1=8$ adet) ve e_2 ise yüksek eleman çiftini ($e_2=1$ adet) göstermektedir. Buna göre mekanizmanın serbestlik derecesi Grübler denkleminde aşağıdaki gibi bulunabilir (Denklemler 1).

$$F = 3(n-1) - 2e_1 - e_2 \quad (1)$$

Değerler yerlerine konulduğunda mekanizmanın serbestlik derecesinin $F=1$ olduğu görülecektir.

3. KAPAK MODEL (DOOR MODEL)

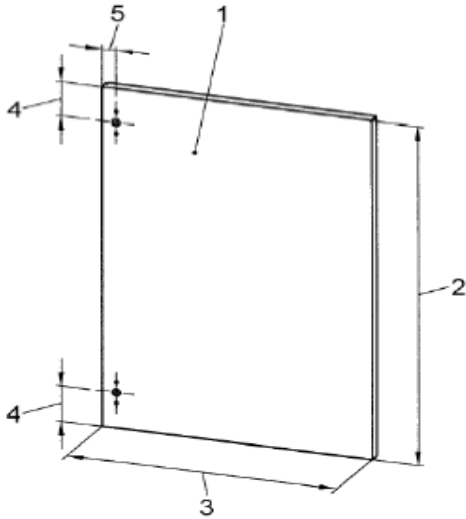
Çalışmada gerçekleştirilen analizler, TS EN 15570 standardı [12] göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Buna göre analiz edilecek menteşe, yukarıda verilen standartta yer alan ve aynı zamanda Tablo 2’de ölçüleri gösterilen kapaklara montajlanmıştır. Tablo 2’de verilen kapakta en üstten taban uçlarına kadar olan mesafe 60 mm’dir (Şekil 4, 4 numaralı uzunluk).

Tablo 2. Standart kapak ölçüleri (Standard door dimensions) [12]

Kapak Tipi	Deney kapağı parametreleri			
	Yükseklik (mm)	Genişlik (mm)	Kanlılık (mm)	Kütle (kg)
A.Yonga	500	400	19	-
B.Yonga	700	600	19	-
C.Yonga	1600	600	19	-
D.CAM*	500	400	-	2.7

* Cam yerine Al veya diğer malzemeler de kullanılabilir

Menteşenin bağlandığı kapak Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Deney kapak modeli (1), yüksekliği (2), genişliği (3), menteşelerin aşağı-yukarı uçlarından olan mesafe (4) ve arka kenardan bağlantı uzaklığı (5)

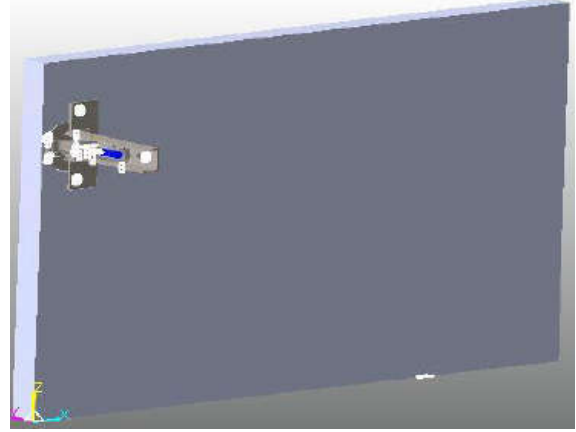
(Experiment door model (1), height (2), width (3), the distance of the hinge to the up and down edges (4), and the distance to the back side connection) (5) [12]

Analizlerde Tablo 2'de yer alan A tipi yonga levha kullanılmış olup, özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur [12].

Tablo 3. Yonga levha özellikleri (The properties of flakeboard) [12]

Özellik	Deney kapağı parametreleri	Gerekler
Vidaların eksen doğrultusunda çıkarılması	EN 320:1993	1 100 ± 100 N
Yoğunluk	EN 323:1933	0.65 ± 0.05 g/cm ³

Çok parçalı gövde kinematik ve kinetik analizlerinde, işlem süresinin kısaltmak için simetrik yapısından dolayı yarım kapak modeli kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Deney düzeneği katı model (Solid model of experimental setup)

4. ANALİZLER (ANALYSES)

4.1. Tas Menteşe Kinematik, Kinetik ve Gerilme-Deformasyon Analizi (Kinematic, Kinetic and Stress-Deformation Analysis of Cup Hinge with Brake)

Analiz süresini kısaltmak amacıyla Şekil 5'te gösterilen kapak, simetri ekseninden bölünerek sadece yarısı modellenmiştir. Tas menteşe uzay düzleminde düz gövdeden sabitlendikten sonra mafsal 2'den hareket verilerek kapak konumuna göre 0°'den 110°'ye kadar açılmıştır. Lineer ve burulma yay sabitleri Denklem 2 ve 3'den hesaplanmıştır.

$$k = \frac{G.d^4}{8.D^3.i} \quad (2)$$

$$k_b = \frac{\pi.G.d^4}{32.l} \quad (3)$$

d :yay çapı [mm]; D :yay halka çapı [mm]; i : yay sarım sayısı; G : kayma modülü [N/mm²]; r : burulma yayı yarı çapı [mm].

Burulma yayının 110°(1.9198 rd) kapak açılımı sırasında biriktirdiği potansiyel enerji ve buna bağlı tork T , Denklem 4'deki gibi ifade edilirse, kapak kapanması sırasında bu enerjinin çarpma olmaması durumu için damperde bulunan yay ve sönüm elemanı tarafından biriktirilmesi gereklidir. İstenilen kapak kapanma ' t ' simülasyon süresi için Denklem 4 kuvvet

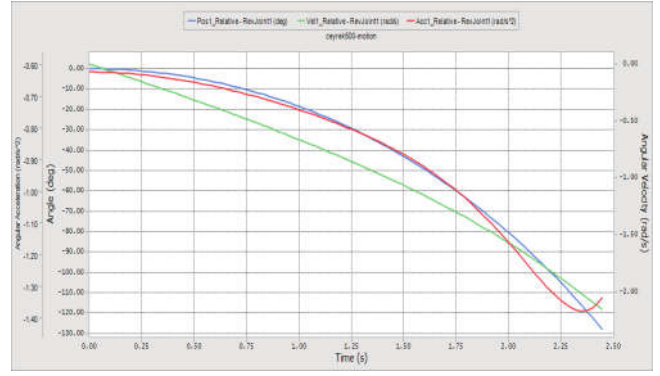
eşitliğinden damper sönüm kat sayısı belirlenmiştir. Hareket esnasında mafsallarda meydana gelen kuvvet, yer değiştirme ve hız değişimleri çok parçalı gövde programıyla çıkarılmıştır. Mafsallar ve yataklar arası sürtünmeler ihmal edilmiştir.

$$\frac{T}{r} = \frac{k_b \cdot \theta}{r} = c \cdot \frac{dx}{dt} + k \cdot x \quad (4)$$

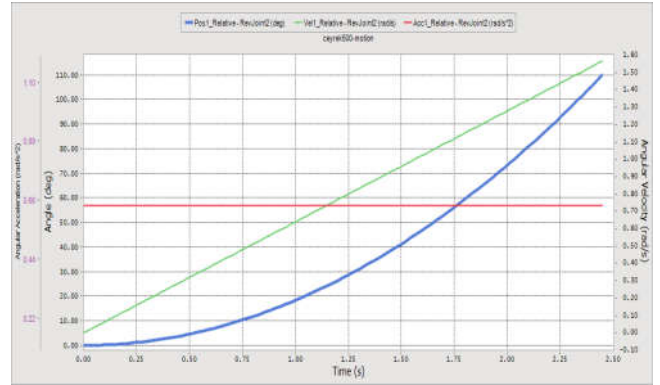
4.1.1. Tas Menteşe Mafsal Kinematik Analizi (Kinematic Analysis of Cup Hinge)

Numaraları Şekil 2’de verilen mafsallara ait açısal konum, hız ve ivme grafikleri Şekil 6’da gösterilmiştir. Mafsal 1 için 110° açısal yer değiştirme ve buna karşılık gelen açısal hız ve ivme değişimleri zamana bağlı olarak görülmektedir. Değişimler incelendiğinde, eğrilerde sıçrama olmaması konstrüksiyon olarak uygunluğunu göstermektedir. 2 numaralı mafsalda 110° açısal yer değiştirme ve buna karşılık gelen açısal hız artış göstermekte iken, ivme değeri sabit kalmaktadır (Şekil 6). “Jerk” ivmenin zamana göre türevini ifade ederken, sistem için, kapak kapanma sırasında mafsallar arası kuvvet iletiminde atalet kaynaklı ani ve sozsuz giden büyüklükte değişimleri gösterecektir. Dolayısıyla bu değişimlerin olması istenilmemektedir.

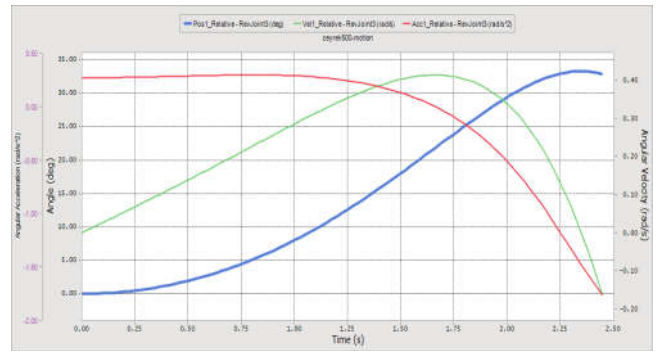
3 ve 4 numaralı mafsallara ait değişimler incelendiğinde, burulma yayının devreye girmesiyle ivmenin negatife geçerek maksimuma vardığı, bunun yanında hız değerinin maksimumuna ivme ve yer değiştirmenin kesiştiği yerde yaklaşık 1.75 saniyede ulaştığı görülmektedir. Yüksek eleman çift olan mafsal 5’te yer değiştirme sırasında hızda meydana gelen değişimlere rağmen açısal ivme değeri 0 değerinde sabit tutularak atalet kuvvetlerinin etkisi minimize edilmiştir. Bu durum 6, 7 ve 8 nolu mafsallar için de geçerlidir. İvmenin negatife geçmesiyle atalet kuvvetinden hareket yönünde faydalanılmaktadır (Şekil 6).



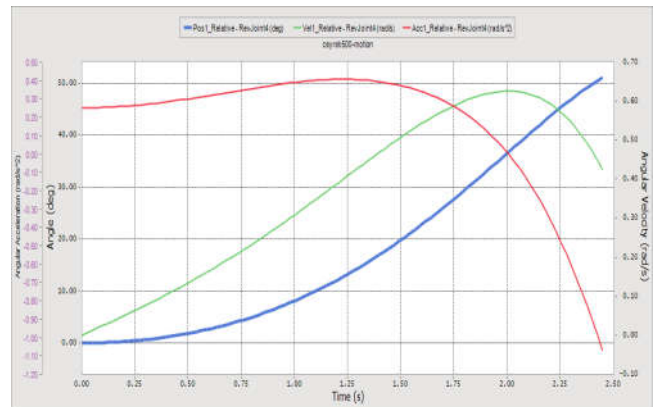
(a)



(b)



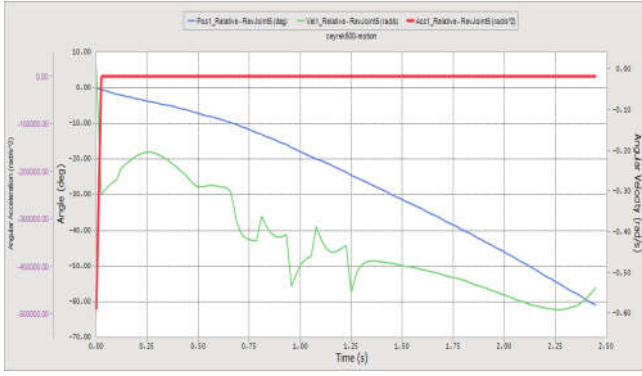
(c)



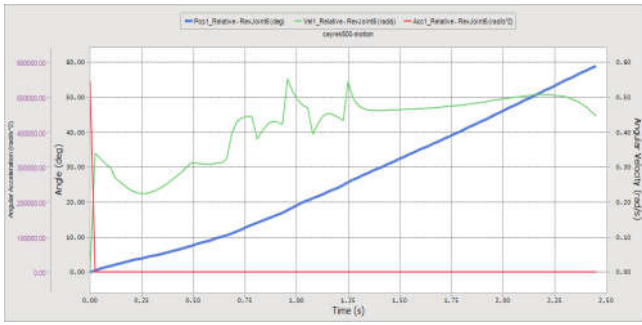
(d)

4.1.2. Tas Menteşe Mafsal Kinetik Analizi (Kinetic Analysis of Cup Hinge)

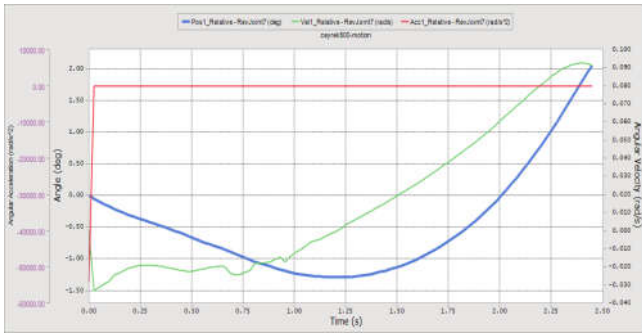
Bileşke reaksiyon kuvvetlerinin x-, y-, z- bileşenlerinin zamana göre değişimleri Şekil 7'de verilmiştir. Kapağın kapanması sırasında ilk 0.5 s içinde mafsal ve yataklarda kuvvet artışı (0.25s) ve sonrasında azalış şeklinde görülmektedir. Bu süre sonrasında kuvvet ve moment değişimi burulma yayı ve damper arasında enerjinin değişimi sırasında oluşmaktadır (Şekil 7 ve 8).



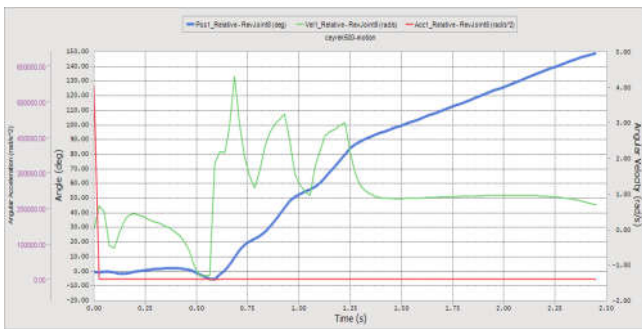
(e)



(f)



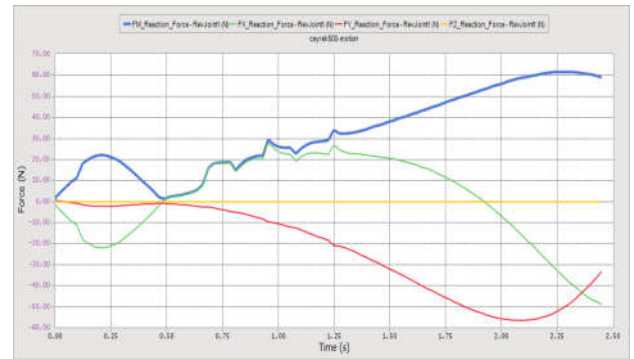
(g)



(h)

Şekil 6. Konum-hız-ivme grafikleri, a) Mafsal 1, b) Mafsal 2, c) Mafsal 3, d) Mafsal 4, e) Mafsal 5, f) Mafsal 6, g) Mafsal 7, h) Mafsal 8

(Position-velocity-acceleration figures, a) Joint 1, b) Joint 2, c) Joint 3, d) Joint 4, e) Joint 5, f) Joint 6, g) Joint 7, h) Joint 8)



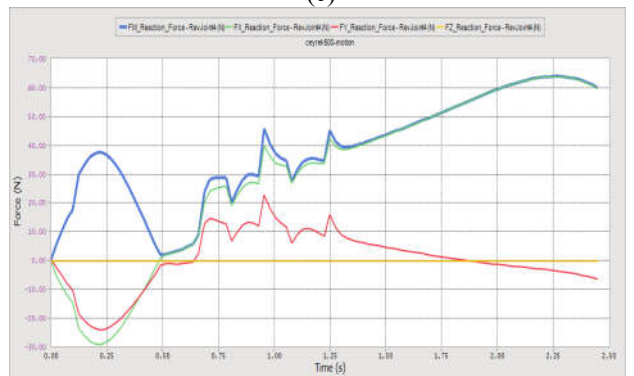
(a)



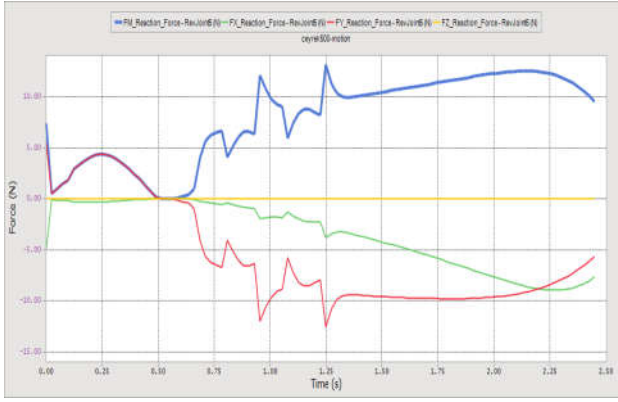
(b)



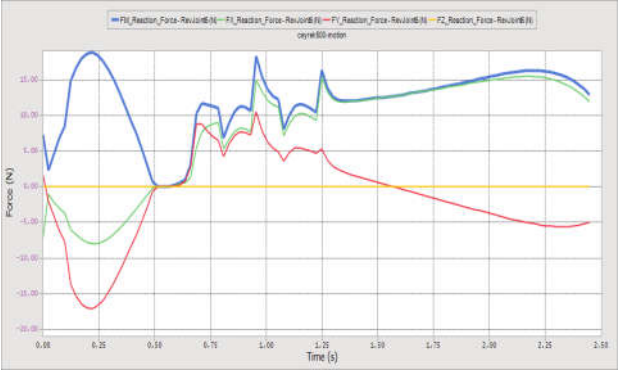
(c)



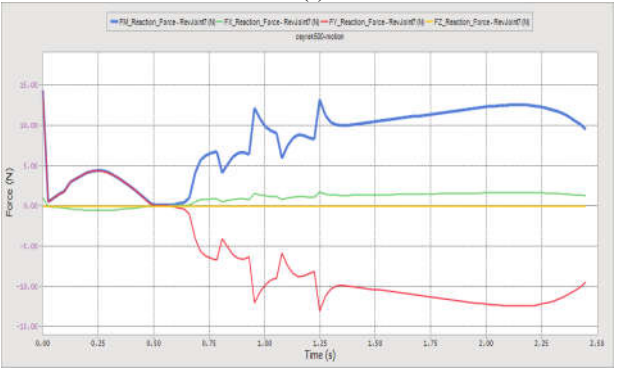
(d)



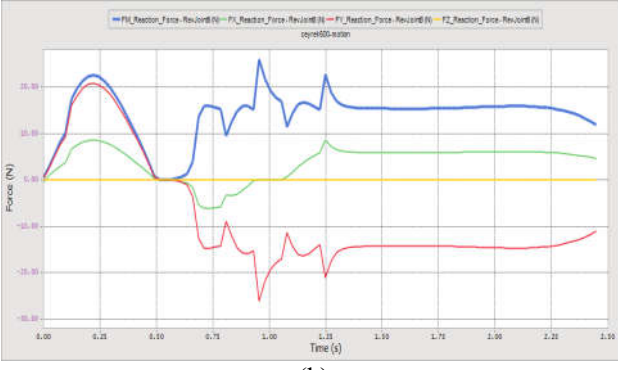
(e)



(f)



(g)



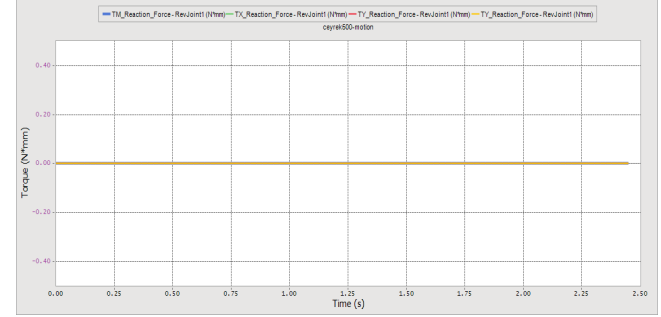
(h)

Şekil 7. Mafsallara ait reaksiyon kuvvetlerinin zamana göre değişimleri, a) Mafsal 1, b) Mafsal 2, c) Mafsal 3, d) Mafsal 4, e) Mafsal 5, f) Mafsal 6, g) Mafsal 7, h) Mafsal 8

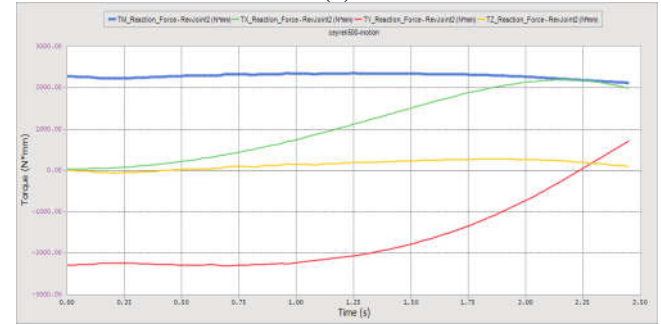
(The change of joint reaction forces versus time, a) Joint 1, b) Joint 2, c) Joint 3, d) Joint 4, e) Joint 5, f) Joint 6, g) Joint 7, h) Joint 8)

Mafsal moment değişimleri ise Şekil 8'de sunulmuştur.

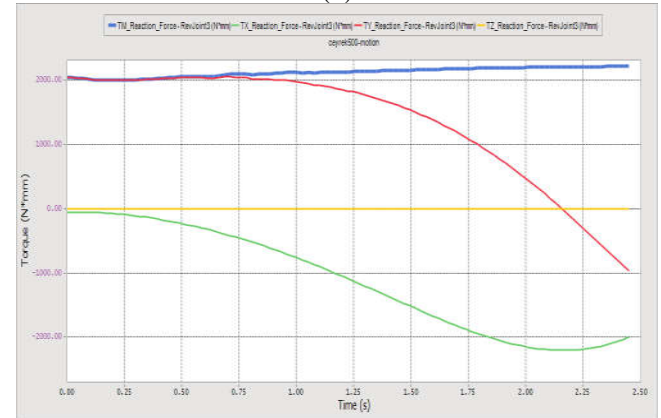
1 nolu yatak elemanında moment sıfır iken x-, y- ve z-yönlerinde reaksiyon kuvvetleri oluşmaktadır. 2 ve 3 numaralı mafsallarda maksimum bileşke kuvvet yaklaşık 65 N, moment 2000 Nmm civarındadır. 4 ve 5 numaralı mafsallarda 60 Nmm civarında reaksiyon momenti oluşmaktadır. 6 nolu mafsalda ise 120 Nmm civarında reaksiyon momenti oluştuğu görülmektedir (Şekil 8).



(a)



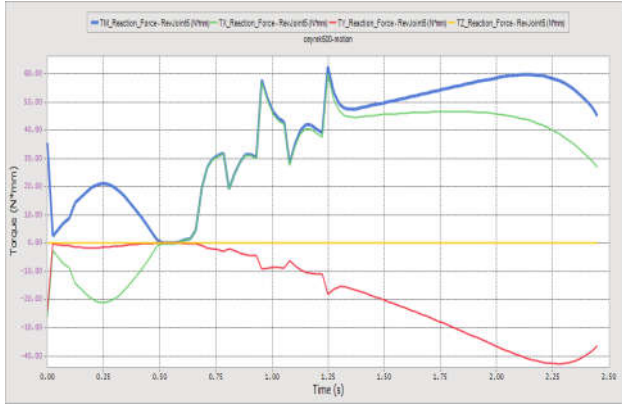
(b)



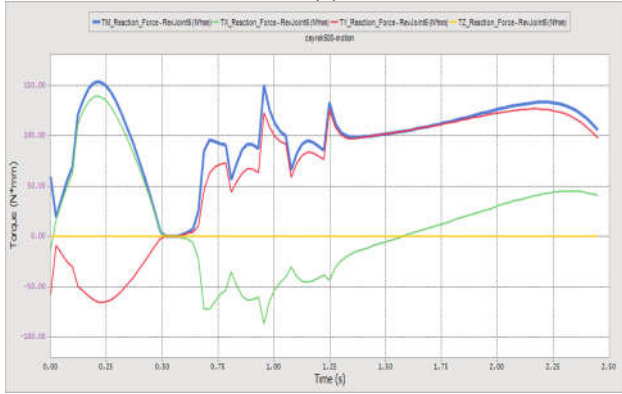
(c)



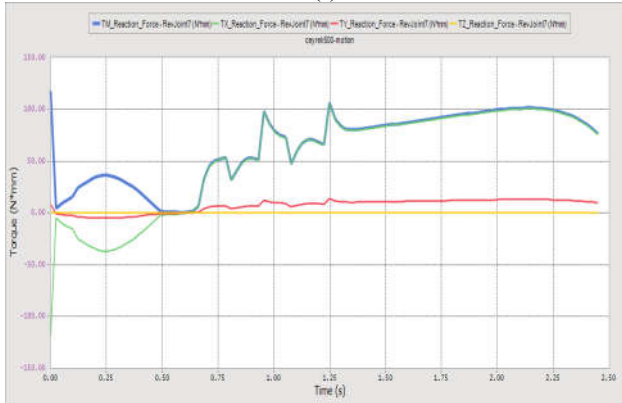
(d)



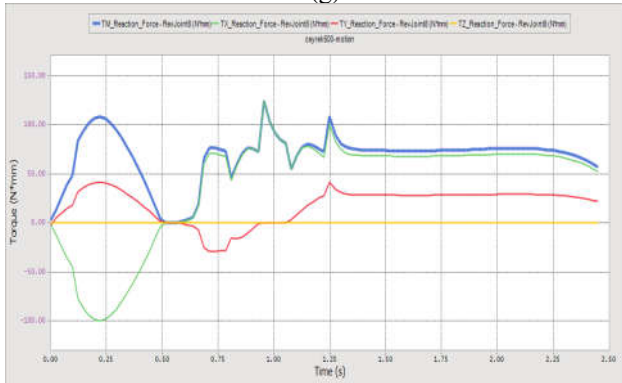
(e)



(f)



(g)



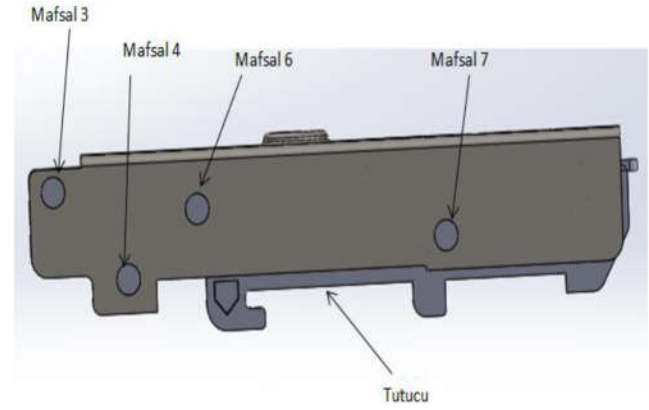
(h)

Şekil 8. Mafsal momentlerinin zamana göre değişimleri, a) Mafsal 1, b) Mafsal 2, c) Mafsal 3, d) Mafsal 4, e) Mafsal 5, f) Mafsal 6, g) Mafsal 7, h) Mafsal 8

(The change of joint moments versus time, a) Joint 1, b) Joint 2, c) Joint 3, d) Joint 4, e) Joint 5, f) Joint 6, g) Joint 7, h) Joint 8)

4.1.3. Tas Menteşe Gerilme-Deformasyon Analizi (Stress-deformation Analysis of Cup Hinge)

Bu kısımda tas menteşenin sonlu elemanlar metodu ile gerçekleştirilen gerilme-deformasyon analiz sonuçları sunulmaktadır. Çok gövdeli kinetik analiz sonucunda oluşan kuvvet ve moment değerlerinin maksimumları mafsalara uygulanmıştır. Gövde, Şekil 9'da gösterildiği gibi tutucu vasıtasıyla zemine sabitlenmiştir.



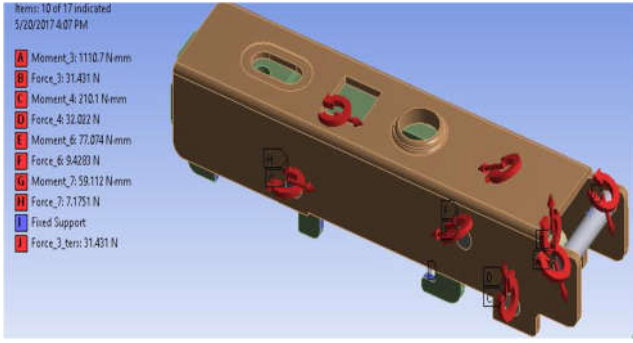
Şekil 9. Tas menteşe düz gövde (Cup hinge flat body)

Sistem modeli Şekil 10'da gösterilmiştir. Sonlu elemanlar modeli ağ yapısı altı yüzlü eleman ağırlıklı olup, eleman ve düğüm noktası sayısı ile eleman kalitesi Tablo 4'de verilmiştir.

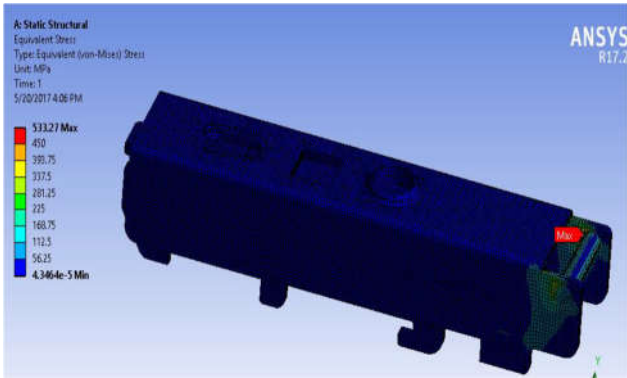
Tablo 4. Sonlu Eleman istatistik değerleri (Statistical values for finite element)

Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı	Eleman Kalitesi
74157	325909	0,7664

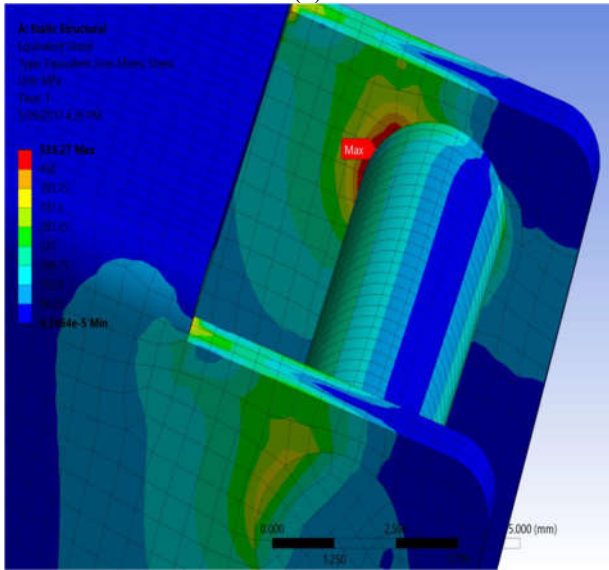
Standarttan bağımsız olarak açılma sırasında oluşan maksimum kuvvet ve tork değerleri kullanılarak yapılan statik analizde, tas menteşede meydana gelen gerilme-deformasyon incelenmiştir (Şekil 11). Tas menteşe mafsal 3 yatak bölgesinde kullanılan malzemenin akma dayanımı geçerek kopma dayanımına yaklaşmış olduğu görülmektedir. Oluşan bu gerilmeleri azaltmak amaçlı 3 nolu yatak bölgesinde iyileştirmeler yapılmalıdır. Geometride oluşan kuvvet akışlarını daha kararlı hale getirmek için tasarımda yüksek eleman çifti yerine adi eleman çiftleri kullanılabilir. Bunun yanında tasarımda daha yüksek akma dayanımına sahip malzeme de kullanılabilir.



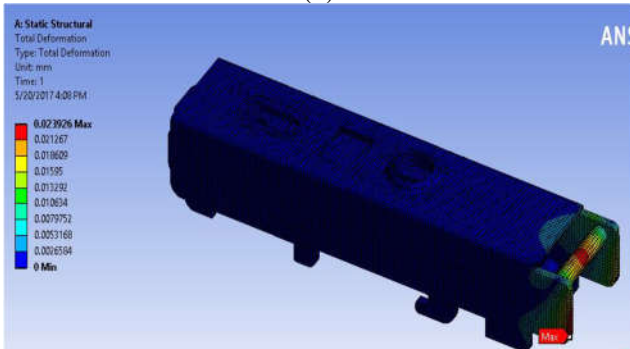
Şekil 10. Tas menteşe düz gövde kuvvet-tork değerleri (Force-torque values of cup hinge flat body)



(a)



(b)



(c)

Şekil 11. Taş menteşe gövde eş değer gerilme değerleri (a), yakın-plan gövde gerilme değerleri (b), gövde deformasyon değerleri (c)

(Cup hinge body equivalent stress values (a), close up body stress values (b), body deformation values (c))

4.2. AŞIRI YÜK DENEYLERİ (OVERLOAD EXPERIMENTS)

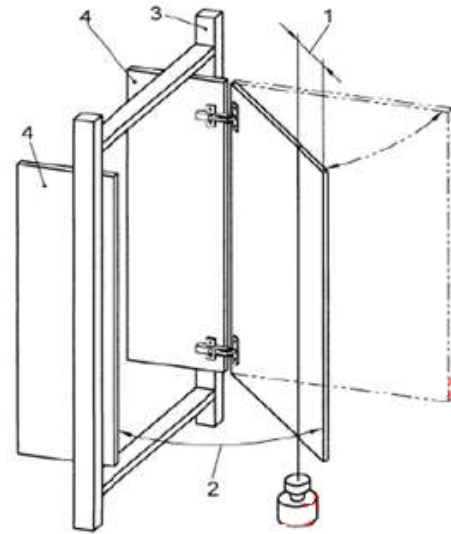
Bu kısımda, TS EN 15570 standardında ifade edilen dikey statik aşırı yük ve yatayda statik aşırı yük deneyleri uygulanarak tas menteşenin yorulma dayanımına bakılmıştır. Uygulanan yükler Tablo 5'te belirtilmiştir.

Tablo 5. Statik yükler (Static loads) [12]

Madde/Deney	Birim	Yükler		
		1	2	3
Dikey statik aşırı yüklenme	kg	-	20	30
Yatay statik aşırı yüklenme	N	-	60	80

4.2.1. Dikey Statik Aşırı Yük Deneyi (Vertical Static Overload Experiment)

Dikey aşırı statik yüklemelerde Tablo 5'te verilen yüklerden 2 numaralı yüklemeye tercih edilmiştir. Modelleme kolaylığından dolayı, yapının simetrik özelliğinden faydalanılmıştır. Analizlerde, yarım kapak modeli kullanıldığından, seçilen kütlein yarısı uygulanmıştır. Kütle, Şekil 12'deki gibi kapak üzerine uygulanır.



Şekil 12. Dikey statik aşırı yük deney modeli [12]

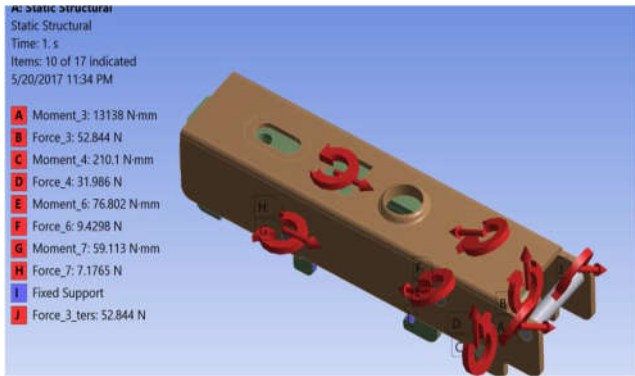
1: 100 mm (Vertical static overload experiment model)

Kapak tamamen kapalı konumdan 135° maksimum olmak üzere mafsal 2'den 110°

açılmıştır. Sistem 10 kez açılır ve kapanır. Bu esnada mafsallarda meydana gelen kinetik çözümler çok parçalı gövde programıyla önceki bölümde olduğu gibi çıkarılmıştır. Elde edilen maksimum değerler sisteme statik olarak uygulanmıştır (Şekil 13).

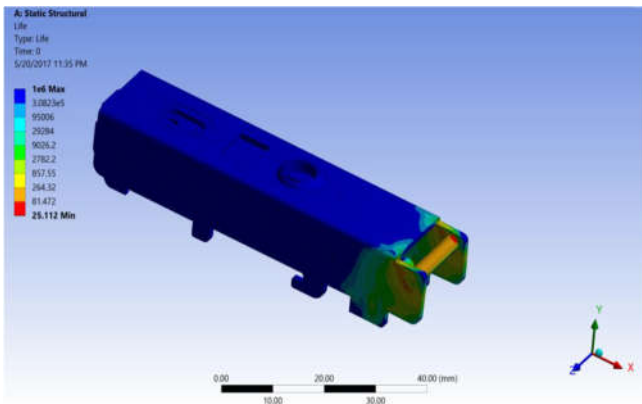
4.2.1.1. Tas Menteşe Yorulma Analizi (Fatigue Analysis of Cup Hinge)

Yorulma analizinde oluşan kuvvetler tam değişken olarak alınarak her bir açma kapama bir çevrim olarak kabul edilmiştir. Analizler sonucunda yorulma ömür değerleri Şekil 14'de verilmiştir.

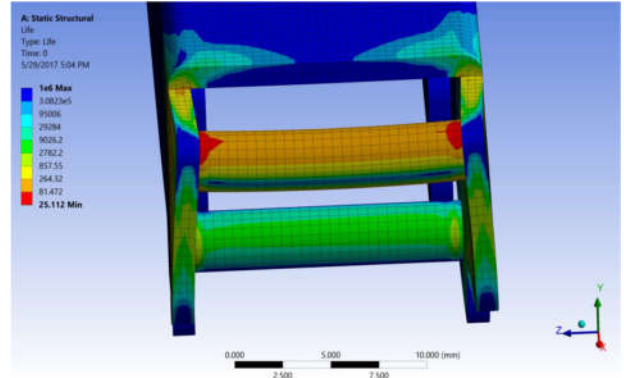


Şekil 13. Tas menteşe gövde sınır şartları (Cup hinge body boundary conditions)

Diğer aşırı yük deneyleri standarda uyularak yapılmıştır. Dikey statik aşırı yük deneyiyle tas menteşenin dikey kuvvetler etkisindeki yorulmasına bakılmıştır. Standartta oluşturulan sistemin minimum 10 çevrime dayanabilmesi ön görülmüştür. Yapılan analiz sonuçlarında tas menteşenin minimum 25 çevrime dayanabildiği sonucuna varılmıştır.



(a)



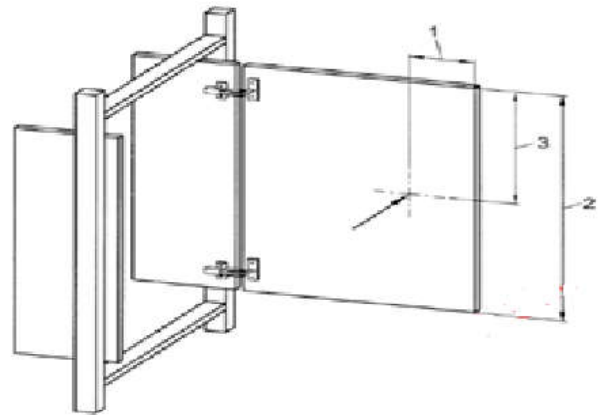
(b)

Şekil 14. Tas menteşe; yorulma analizi sonuçları (a), yorulma analizi sonuçları (yakın plan) (b)

(Cup hinge; fatigue analyses results (a), fatigue analyses results (close up) (b))

4.2.1. Yatayda Statik Aşırı Yük Deneyi (Horizontally Static Overload Experiment)

Yatayda statik aşırı yük deneylerinin gerçekleştirilirken de Tablo 5'te belirtilen yüklerden, 2 numaralı yük tercih edilmiş olup kapak, simetri ekseninde ikiye ayrılıp sadece yarısı modellendiğinden dolayı, verilen kütle yarısı uygulanmıştır. Kütle, Şekil 15'teki gibi kapak üzerine uygulanır. Kapak tamamen kapalı konumdan, en fazla 135° olmak üzere mafsal 2'den 110° açılmıştır. Sistem 10 kez açılır ve kapanır. Bu esnada mafsallarda meydana gelen kinetik çözümler çok parçalı gövde programıyla çıkarılmıştır.



Şekil 15. Yatay statik aşırı yük model [12]

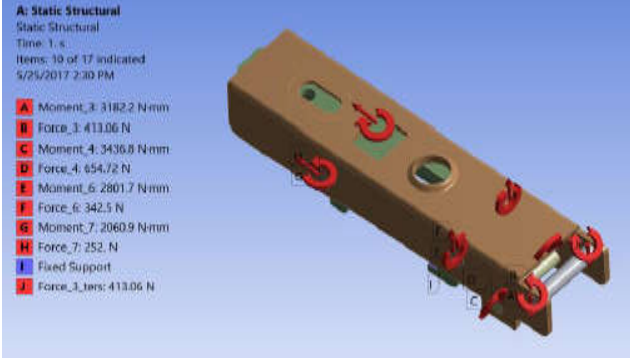
1: 100 mm, 2: Kapak yüksekliği, 3: Yarım kapak yüksekliği

(Horizontally static overload model)

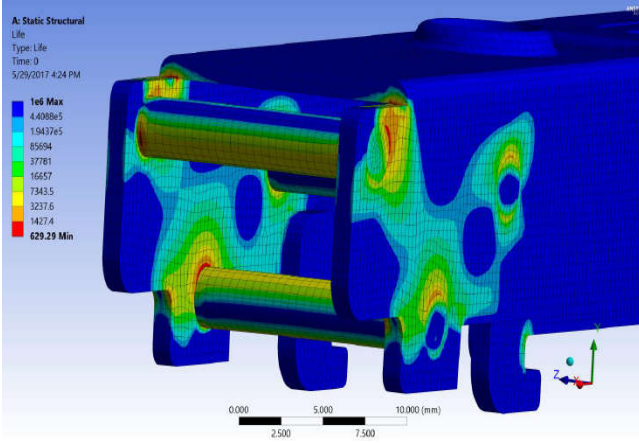
1: 100 mm, 2: Door height, 3: Half door height) [12]

4.2.1.1 Tas Menteşe Yorulma Analizi (Fatigue analysis of cup Hinge)

Tas menteşe gövde de bulunan mafsallara gelen maksimum kuvvet ve tork değerleri sisteme uygulanarak, maksimum eşdeğer gerilme ve yer değiştirme değerleri bulunmuş, Şekil 16 ve 17’de sunulmuşlardır.



Şekil 16. Tas menteşe gövde kuvvet ve tork değerleri (Cup hinge body force and torque values)



Şekil 17. Tas menteşe gövde yorulma analizi sonuçları (Cup hinge body fatigue analyses results)

Yatayda statik aşırı yük deneyi ile menteşenin yatay kuvvetler etkisindeki yorulmasına bakılmıştır. Sistemin minimum 10 çevrime dayanabilmesi standartta belirtilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında tas menteşenin minimum 629 çevrime dayanabildiği sonucuna varılmıştır.

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, AISI 1045 soğuk çekilmiş çelik malzemeden imal edilmiş tas menteşelerin yapısal analizleri TS EN 15570 standardı gözönüne alınarak sonlu elemanlar metodu yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Çok parçalı gövde analiz programı ile yapılan kinematik ve kinetik analiz sonuçlarının sistem için sonlu elemanlar yöntemi ile statik ve yorulma analizinde kullanılması sonlu elemanlar programı geçici cevap analizine alternatif olarak

gösterilmiştir. Çiftler arası kuvvet iletimi ve oluşan gerilme değerleri, noktasal ve yüzeysel temas değişimi ile emniyetli bölge içinde kalınabilir. Analiz sonucunda yapısal değişiklikler konusunda ilk örnek öncesinde önlem alıcı çözümler geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] <http://www.woissmobili.com.tr/Tarihce>
- [2] MEGEP, Ahşap Teknolojileri, Mobilya Bağlantı Elemanları, Ankara, 2008.
- [3] MEGEP, Ahşap Teknolojileri, Mobilya Elemanları-2, Ankara, 2008.
- [4] M. Hou, M. Ye and Y-W. Mai, “Manufacturing and testing of thermoplastic composite high load hinge”, *Journal of thermoplastic composite Materials*, Vol. 12, 1999.
- [5] S. Doğan, C. Güven, F. Kapat, T.G. Yılmaz and O. Dogan, “Experimental verification and finite element analyses of automotive door hinge”, *ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 2014.
- [6] D-T. Nguyen and Y-S. Kim, “Combination of isotropic and kinematic hardening to predict fracture and improve press formability of a door hinge”, *Proc. IMechE Part B: J. Engineering Manufacture*, vol. 224, 2009.
- [7] İ. Özkol ve B. Baykuş, “Paralel menteşe sistemi mekanizmasının dört-çubuk mekanizma sistemi yaklaşımı ile tasarımı ve kinematik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen bilimler Enstitüsü, Uçak ve Uzay Müh. Programı, 2010.
- [8] X. Zhang, A.G. Erdman and H. Zhang, “Tolerance analyses of a three-hinge door system”, *ASME 2002 International Design Engineering, Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 2002.
- [9] F-C. Chen, “Analysis and verification of Watt I six-bar furniture hinge mechanism”, *Proceeding of Institution of Mechanical Engineers Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2005.

- [10] Y.M. Huang, “The stress analysis of hinge structure for notebook”, Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, Chung Hsing University, 2001.
- [11] H. Bilyaz, Tez Danışmanı C. Demir, “Tas menteşe kinematik, kinetik ve gerilme-deformasyon analizi”, Bitirme Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, , İstanbul, 2017.
- [12] TSE, TS EN 15570 Mobilya Donanımı-Menteşeler ve Menteşe Elemanlarının Mukavemet ve Dayanıklılığı-Dikey Bir Eksen Etrafında Dönen Menteşeler, Ankara, 2008.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 15.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 22.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.292296	

Isıl konfor sıcaklıklarına bağlı olarak bir konutun enerji performansının değerlendirilmesi: İzmir örneği

Nurdan Yıldırım^{*1}, Ebru Kuzgunkaya², Gülden Gökçen Akkurt³

ÖZ

Türkiye’de enerji tüketiminin yaklaşık %34’ü binalarda ve bunun %85 kadarı da ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılmaktadır. Binalarda bulunan HVAC sistemlerinin işletme özellikleri, hem binanın ısıl konforunu hem de enerji tüketimlerini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, HVAC sistemlerinin işletme şartlarının, ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimlerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla İzmir ilindeki 100 m²’lik bir konut için öngörülen HVAC sisteminin kesikli ve sürekli rejimde, tek ve çift sıcaklık set değerleri ile tam mekanik kontrollü veya doğal havalandırılmalı olarak çalıştırılması durumları incelenmiştir.

Isıl konfordan olan memnuniyet; Tahmini Ortalama Oy (Predicted Mean Vote - PMV) değeri ile ifade edilmektedir. Bu kapsamda öncelikle, Design Builder yazılımı kullanılarak en iyi duruma karşılık gelen PMV=0’a göre HVAC sisteminin set sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu sıcaklık set değerlerinin kullanılması ile ele alınan 5 farklı durumda konut için yıllık birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen 5 durum arasında normal beklenti seviyesinde % 99,6 kümülatif frekans yüzdesi ile ısıl konforu en çok sağlayan tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerli durumdur. Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değerli durum ise 2,04 kWh/m²/%KF birim memnuniyet enerji tüketimi değeri ile en az enerji tüketen durum olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: ısıl konfor, enerji tüketimi, PMV, Fanger ve adaptif metod

* Corresponding Author

¹ Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, nurdan.yildirim@yasar.edu.tr

² İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi, ebru.kuzgunkaya@iyte.edu.tr

³ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, guldengokcen@iyte.edu.tr

Energy performance assessment of a residential house based on thermal comfort temperatures: Izmir sample

ABSTRACT

34% of the energy consumption in Turkey belongs to buildings and around 85% of this consumption is utilized for heating purposes. The operating characteristics of the HVAC systems in buildings directly affect both the building's thermal comfort and energy consumption. This study aims to determine the effect of operating conditions of the HVAC system on thermal comfort and energy consumption of residential buildings. For this purpose, the HVAC system for a 100 sqm residence in İzmir city has been investigated according to the single and double temperature set values at continues and intermittent operating modes for fully mechanically control or natural ventilation conditions.

Thermal comfort satisfaction is expressed by PMV value. In this context, primarily the set temperatures of the HVAC system are determined for $PMV = 0$ which represents the best case of thermal comfort by using Design Builder software. Annual specific heating/cooling energy consumption, annual primer specific energy consumption, hourly PMV values during occupancy hours and statistical evaluation of these PMV values of a residential house are realized for considered 5 different operating conditions of HVAC system by using determined temperature set values. According to the obtained results, among 5 cases, the case with fully mechanical controlled, continuous regime, monthly dual heating/cooling operative set values, provides the maximum thermal comfort for normal expectation level of the thermal comfort with a cumulative frequency of 99.6%. The case, with fully mechanical controlled, intermittent regime, monthly single heating/cooling operative set values, consumes the minimum energy with specific satisfaction energy consumption of 2.04 kWh/m²/% KF.

Keywords: thermal comfort, energy consumption, PMV, Fanger and adaptive method

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Avrupa Birliği'nde binalarda enerji tüketiminin azaltılması amacıyla yayınlanan DIRECTIVE 2002/92/EC [1], her üye ülkenin binaların enerji performansının hesaplanması için bir metot geliştirmesini öngörmekte ve bu metotta enerji ihtiyaçlarının belirlenmesinde iç ısı konfor koşullarının gözetilmesini şart koşmaktadır. Binalarda ısı konfor ve iç hava kalitesinin belirlenmesine yönelik olarak kullanılan standartlar EN ISO 7730 [2], CR 1752 [3], ASHRAE 55-2013 [4] ve TS 2164 [5]'dür.

Binaların ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı/tüketimi, ısı konfor ihtiyacına bağlı olarak değişir ve bu nedenle ısı konfor seviyesinin net bir şekilde tanımlanması önemlidir. Binalarda enerji performansı ile konfor seviyesinin ilişkilendirilmesi üzerine yapılmış pek çok çalışma mevcuttur [6-15]. Isıl konfor seviyesinin sınıflandırılması ve sertifikasyonu prEN 15251 [16] standardı tarafından yapılmaktadır. Bu standart, HVAC sistem tasarımında kullanılacak

ısı konfor parametrelerinin belirlenmesinin yanısıra ölçüm ve hesaplamalardan kaynaklanan uzun vadeli ısı konfor değerlendirme metodlarını da tanımlar. Isıl konfor seviyesi 4 kategoride sınıflandırılır: I. kategori, ısı konfor açısından en yüksek beklenti seviyesini, dolayısı ile en yüksek memnuniyet seviyesini ($-0,2 < PMV < +0,2$) gösterir. Engelli, hasta kişiler, yaşlılar ve çocukların bulunduğu hacimler için tavsiye edilir. II. kategori, yeni ve tadilat görmüş binalar için kullanılır ve normal beklenti seviyesine karşılık gelir. Bu kategori için $-0,5 < PMV < +0,5$ aralığı önerilir ki standartlarda ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ısı konfor aralığıdır [2, 6, 13, 17-19] ve Beklenen Memnuniyetsizlik Yüzdesi (Predicted Percentage Dissatisfied - PPD) göstergesi % 10'un altındadır. Havalandırma Binalar için - Bina İç Ortamlar İçin Tasarım Kuralları standardı olan CR 1752 [3]'ye göre bu aralık Kategori B olarak tanımlanır.

Konfor koşulları; hava sıcaklığı, bağıl nemi ve hızının yanı sıra hacmi çevreleyen yüzeyler ile hacim içinde yer alan objelerin yüzey sıcaklıkları (ortalama radyasyon sıcaklığı) ile doğrudan

ilişkilidir. Hava sıcaklığı ile ortalama radyasyon sıcaklığının kombinasyonundan oluşan operatif sıcaklık, ısı konforunun tanımlanması için önemli bir sıcaklıktır [2], [4], [17]. İnsan vücudu operatif sıcaklığa karşı daha hassastır ve bu nedenle ASHRAE 55 [4] ve EN ISO 7730 [2]'de ısı konfor sıcaklığı olarak "operatif sıcaklık" değerleri verilmiştir. Her bir kategori için, değişen PMV aralıklarına karşılık gelen ve hacimde yaşayanların hareket düzeyi ve giyim şekline bağlı ve ısı konforunun tanımlanması için önemli bir sıcaklık olan operatif sıcaklıklar belirlenebilir [20-21].

Isıl konfor ve bunun enerji tüketimi ile ilişkisi, ısı konforu sağlayan HVAC sistem stratejilerine (mekanik, doğal, hibrit) bağlı olarak analiz edilir. Bu stratejiler kullanıcı beklentileri ve davranışlarına bağlıdır. Fanger ısı konfor modeli, kullanıcı müdahalesine izin vermeyen kontrollü bir HVAC sisteminin mevcut olduğu, tamamen kapalı (doğal havalandırmanın mümkün olmadığı) bir iklim çemberinde bulunan kişiler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile geliştirilmiştir. Bu nedenle merkezi HVAC sistemi bulunan binaların ısı konforu değerlendirmeleri PMV indeksine dayanan Fanger modeli [4, 17, 22-24] ile belirlenir. Öte yandan saha çalışmaları pencerelerin açılabilirdiği (doğal havalandırmanın olduğu), kullanıcı müdahalesine izin veren HVAC sistemlerinin kullanıldığı binalarda, kişilerin ısı konforunun, Fanger modelinden farklı şekilde değerlendirildiği görülmüştür. Bütünüyle mekanik olarak kontrol edilmeyen binalarda, kullanıcıların ısı konforu sıcaklığı aralığı beklentileri Fanger teorisi ile elde edilen aralığa göre daha geniş ve kullanıcılar kendilerini psikolojik, fizyolojik ve davranışsal olarak dış ortam koşullarına adapte ederler. Bu nedenle doğal havalandırmanın olduğu binalarda "dinamik" adaptif konfor yaklaşımı kullanımı [18, 25-30] ya da genişletilmiş PMV modeli [31] önerilmektedir. Adaptif konfor yaklaşımının kullanımında "kişisel kontrol" önemlidir [32]. Kişiler giyim durumlarını ya da pencere açarak ortamın hava hızını artırarak ısı koşulları kontrol edebilirler [33]. Özellikle yaz aylarında pencerelerin açılması dolayısıyla gerçekleşen doğal havalandırma ile PMV modeli ile belirlenen sıcaklıklardan daha yüksek iç hava sıcaklıklarında kişiler konforlu hissedebilmektedir. Bu da enerji tüketiminin azalması anlamına gelir [27].

İnsan vücudu operatif sıcaklığa daha hassas olmasına rağmen, operatif sıcaklığı ölçen termometrelerin pahalı ve büyük boyutlu olması,

operatif sıcaklığın hacmin farklı noktalarında farklı olması gibi nedenlerden kaynaklanan ölçüm problemleri HVAC sistem kontrollerinin hava sıcaklığına göre yapılmasına neden olmaktadır [12, 34-35]. Operatif sıcaklığın ölçülmesindeki zorluklar, ölçümü kolay olan (dış hava sıcaklığı, enerji tüketimi, zaman vb.) parametreler kullanılarak tahmin edilmesi yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu yöntemlerden biri de incelenen hacmin ya da binanın yapay sınır ağları ile modellenmesidir. Yapılan çalışmalarda ölçüm değerleri ile karşılaştırıldığında operatif sıcaklık tahminlerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür [36].

Türkiye'de binalarda enerji performansı çalışmaları, TS 825 [37]'nin zorunlu hale gelmesi ile 2000'li yıllarda başlamış olup ısıtma ve soğutma sezonlarında iç ortam set sıcaklığının sabit tutularak binaların enerji ihtiyacı/tüketimleri ile bu ihtiyaç/tüketimleri azaltacak önlemlerin simüle edilmesini içermektedir [38-41].

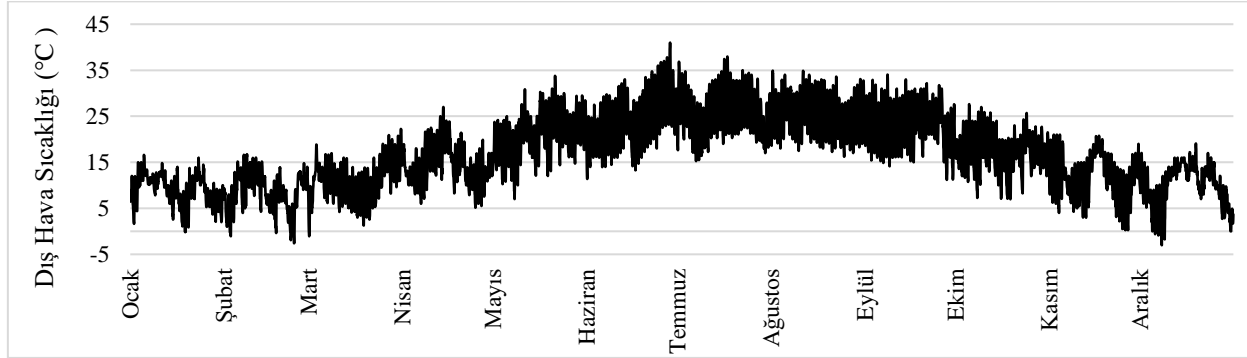
İstanbul'da bir ofis binasının ısıtma/soğutma enerji ihtiyacı EnergyPlus yazılımı ile simüle edilmiş ve bina yönetim sisteminden alınan ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı ofis binasının Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesinden seçilen İstanbul, Ankara, İzmir ve Antalya illerinde bulunması durumlarında alınabilecek enerji tasarrufu önlemleri yine EnergyPlus yardımı ile belirlenmiştir. Ofislerde iç hava sıcaklıkları ısıtma ve soğutma sezonları için set edilmiş ve bu sıcaklıklarda dış hava sıcaklıkları, yalıtım, bina görüş faktörü, dış yüzeylerin rengi, gölgeleme, ventilasyon hızı ve farklı dış hava kontrol stratejilerinin ısıtma/soğutma ihtiyacına olan etkileri belirlenmiştir [38].

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne ait bir binada ısıtma ve soğutma sezonlarında iç hava sıcaklığı sabit tutularak binanın enerji tüketimleri Ecotect ve EnergyPlus yazılımları ile belirlenmiş, ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve tüketimlerin azaltılması yönünde alınabilecek önlemler simüle edilmiştir [42]. Balıkesir Üniversitesi'nde yapılan çalışmada, üniversiteye ait bir binada enerji tüketim verileri toplanmış, tüketim değerlerinin binaya yalıtım uygulanması, kazan veriminin artırılması ve doğal aydınlatma ile gerçekleşecek enerji tasarrufu ile azaltılması ve buna bağlı olarak gerçekleşecek sera gazı emisyonlarındaki düşüş belirlenmiştir [43]. Bir diğer çalışma ise Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Isı Tekniği Laboratuvarında bulunan iklimlendirme

DesignBuilder [45] yazılımının veri tabanında Energy Plus (epw) formatında İzmir için saatlik meteorolojik veriler mevcuttur (Şekil 2).

İncelenen örnek konutta 4 kişilik bir ailenin yaşadığı ve ailenin konutta bulunduğu saatler

Tablo 2’de verildiği şekilde kabul edilmiştir. Tablo 2’ye göre aile yılın %73’ünü (6411 saat) konutta geçirmektedir. HVAC sisteminin kesikli çalışma durumundaki çalışma saatleri de ailenin konutta bulunduğu saatler göz önüne alınarak belirlenmiş ve Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. İzmir ili için Energy Plus (epw) formatında saatlik dış hava sıcaklığı (Hourly outdoor temperature in Energy Plus (epw) format for Izmir province.)

Tablo 2. Ailenin konutta bulunduğu saatler ve HVAC sistemi çalışma saatleri (kesikli) (Occupancy hours and operating hours of HVAC system).

Ailenin konutta bulunduğu saatler	Hafta içi	Hafta sonu	
	18:00-08:00	Tüm gün	
	18:00-08:00	Tüm gün	
Çalışma rejimi	Isıtma	17:00-08:00	Tüm gün
	Soğutma	18:00-24:00	11:00-24:00

- Ailenin konutta bulunma durumuna bağlı olarak değişen metabolik kazançlar, cihaz kullanımı ve aydınlatmadan kaynaklanan iç ısı kazançları TS EN 832 [46]’ye göre konut ortalaması 5 W/m² olacak şekilde belirlenmiştir.

3. YÖNTEM (METHOD)

Çalışmada yapılan başlıca kabuller ve alınan değerler aşağıda listelenmiştir:

- Konuttaki insan yoğunluğu 0,04 kişi/m²’dir.
- Simülasyonlarda, ısıl konforu etkileyen iç mekan iklimsel parametrelerinden olan hava hızı 0,1 m/s’den düşük olarak kabul edilmiş, kişisel parametrelerden olan konut içindeki aktivite seviyesi ise 0,9 met olarak sabit tutulmuştur.
- Çalışmada sıcak su ve aydınlatma enerji tüketimleri dikkate alınmamış, sadece ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri incelenmiştir.
- Konutta ısıtma sistemi olarak doğal gaz yakıtlı kazan ve sıcak sulu radyatör sistemi, soğutma sistemi olarak da klima kullanımı öngörülmüştür.
- Konutun ısıtma/soğutma enerji tüketiminin belirlenmesinde doğal gaz ile klimaların elektrik tüketimi dikkate alınmıştır.
- Isıtma/soğutma sisteminde kullanılan fan, pompa vb. yardımcı ekipmanların tüketimi elektrik tüketimine dahil edilmemiştir.
- Isıtma sistem verimi %85, soğutma sistemi COP değeri 3 olarak alınmıştır.

Konutun ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimi arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için, örnek konutun ısıtma/soğutma sistemi, kesikli ve sürekli çalışma rejimi benimsenerek EnergyPlus yazılımında aylık olarak simüle edilmiştir.

EnergyPlus, 2001 yılında ABD Enerji Bakanlığı [47] tarafından geliştirilmiş modüler bir yazılımdır. İki yılda bir yenilenir ve BLAST ile DOE-2’nin en iyi özelliklerinin birleşiminden oluşur. Yazılım ASHRAE Isıl Denge Metodu’nu kullanır. Isıl Denge Metodu; saatlik-dinamik bir metot olup güneş kazançları ve iç kazançların detaylı hesaplanması, iç yüzey sıcaklıklarının her yüzey için ayrı ayrı tanımlanması, doğal havalandırma, gölgeleme, HVAC ekipmanları ve ısıl kütlelerin dahil edilmesi ile fiziksel duruma en yakın ve kabullerin en aza indirildiği, dolayısı ile de gerçeğe en yakın sonuçları verir [48-50]. EnergyPlus, ANSI/ASHRAE 140 [51] doğrulamasına sahiptir.

Bu çalışmada, HVAC sistemleri Fanger ısıl konfor modeline göre tam mekanik kontrollü ve De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak doğal havalandırılmalı olacak

şekilde 2 ana kategoride ele alınmış olup, sıcaklık set değerlerine göre ise 5 alternatif durum için simülasyonlar yapılmıştır. Eğer ısıtma/soğutma sistemleri tek bir sıcaklığa göre değil, belirli bir sıcaklık aralığına göre çalıştırılıyorsa ölü bantlı çift sıcaklık set değeri olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda çalışmada ele alınan simülasyonlar;

- Durum 1: Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 2: Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değeri
- Durum 3: Tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 4: Tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 5: Doğal havalandırılmalı, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri

Simülasyonlarda, mekanik kontrollü HVAC sistemlerinde öncelikli olarak operatif termostat bir diğer alternatif olarak hava sıcaklığı set değerleri kullanılmıştır.

Durum 4 olarak adlandırılan alternatifte HVAC sistemleri için iki farklı operatif sıcaklık set değerleri (ölü bantlı çift sıcaklık set değeri) belirlenerek HVAC sistemlerinin bu iki sıcaklık değeri arasında simülasyonları yapılmıştır.

Doğal havalandırmaya dolayısı ile kişisel kontrole izin verilen adaptif konfor yaklaşımında De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak alt ve üst operatif sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

3.1. Sıcaklık set değerlerinin belirlenmesi (Determination of Temperature Set Values)

Her bir simülasyon adımında aylık olarak; ASHRAE 55-2013 [4] ve ISO 7730 [2]'da verilen 19,0-26,5°C ısıtma, 23,5-28,0°C soğutma operatif sıcaklık aralıkları için 1°C'lik sıcaklık adımlarında konut simüle edilmiş ve aylık ortalama PMV değerleri belirlenmiştir. Set sıcaklıkları ile aylık ortalama PMV değerlerinin lineer olarak değiştiği gözlenmiştir. Dolayısı ile simüle edilen her bir ay için Set Sıcaklığı-PMV eğrileri oluşturularak -

0,5<PMV<+0,5 konfor aralığında PMV'yi -0,5, 0 ve +0,5 yapan aylık sıcaklık (operatif, hava) set değerleri belirlenmiştir.

Ölü bantlı çift sıcaklık set değerinin belirlenmesi için kesikli rejimde PMV=0 yapan operatif set sıcaklıkları simülasyonda ölü bantlı çift sıcaklık modunda birincil set sıcaklığı olarak kullanılmıştır. İkincil set sıcaklıkları için ısıtmada PMV'yi -0,5, soğutmada ise PMV'yi +0,5 yapan operatif sıcaklık değerleri kullanılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır.

Doğal havalandırma için %90 kabul edilebilir alt ve üst, operatif sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1 ve 2'de olduğu gibi belirlenir [18, 25-29].

$$\text{ÜSL (üst sıcaklık limiti)} = 0,31 * T_0 + 20,3 \quad (1)$$

$$\text{ASL (alt sıcaklık limiti)} = 0,31 * T_0 + 15,3 \quad (2)$$

$T_0 =$ Dış hava sıcaklığı (°C)

3.2. Saatlik PMV Değerlerinin Belirlenmesi ve İstatistiksel Değerlendirme (Determination of Hourly PMV Values and Statistical Evaluation)

Bir yıl için PMV=0 yapan set sıcaklıkları simülasyonlarda giriş verisi olarak kullanılmış ve ailenin konutta bulunduğu saatler için çalıştırılan simülasyonlardan elde edilen saatlik PMV değerleri çıkış verisi olarak elde edilmiştir. Yıl boyunca elde edilen saatlik PMV değerleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Frekans dağılımları ve dağılım özellikleri (ortalama değer, orta değer, standard sapma, varyans, en küçük değer, en büyük değer ve aralık) ile ailenin konutta bulunduğu saatlerin % kaçının -0,2<PMV<+0,2 ve -0,5<PMV<+0,5 konfor aralıklarına düştüğü belirlenmiştir.

4. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

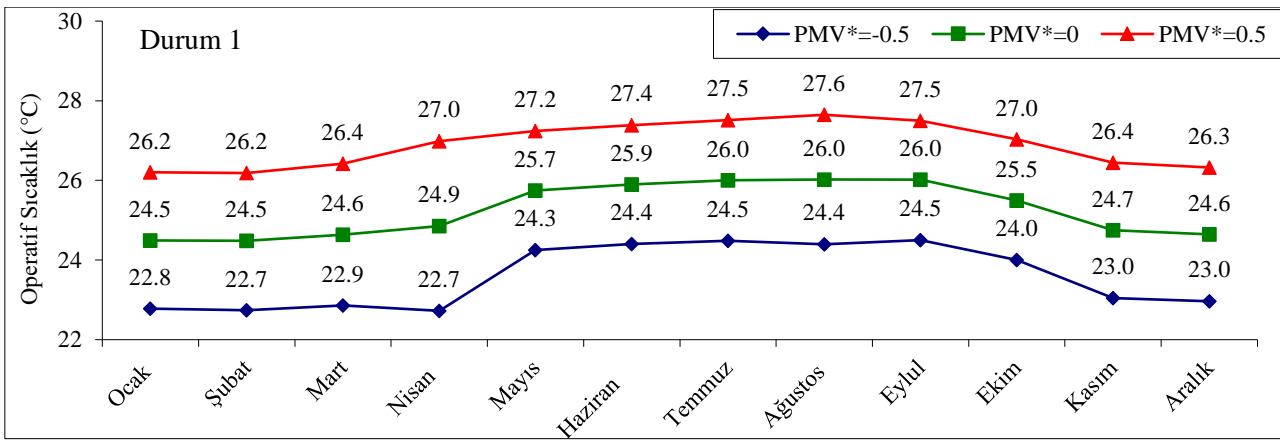
İzmir ilindeki bir konut için ısıtma/soğutma sistemlerinin çalışma şartlarının, ısı konfor koşulları ile enerji tüketimlerine etkisi 5 farklı durum analiz edilmiştir. Dinamik simülasyon yöntemlerinden olan EnergyPlus ve arayüz olarak Design Builder kullanılarak yapılan toplam 540 simülasyon ile öncelikle ısıtma/soğutma sistemlerinin sıcaklık set değerleri belirlenerek,

daha sonra elde edilen bu set değerlerinin kullanılması ile her bir durumun birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, yıllık birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

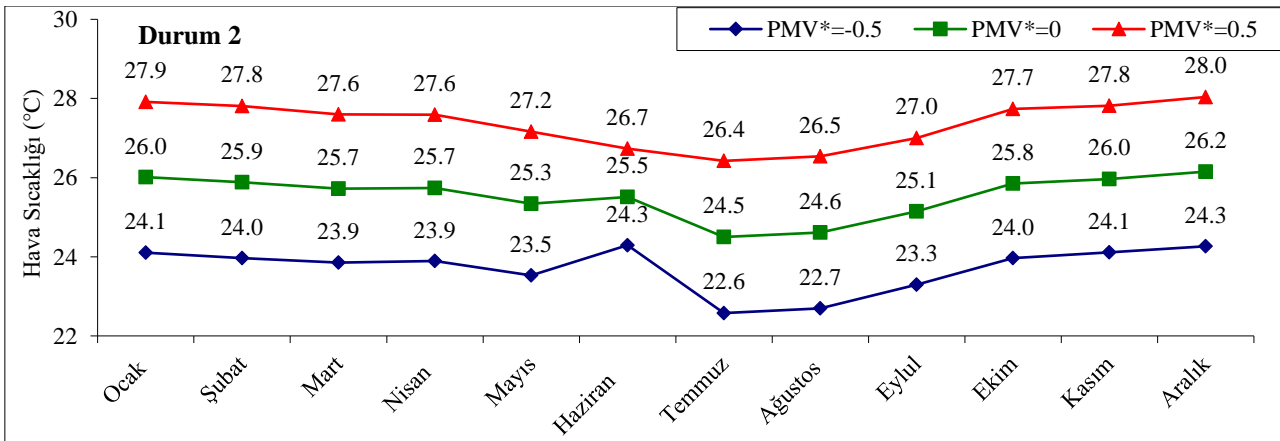
4.1. Sıcaklık Set Değerlerinin Belirlenmesi (Determination of Temperature Set Values)

Durum 1, 2 ve 3 için $PMV=-0,5$, 0 ve $+0,5$ 'i sağlayan ısıtma/soğutma sisteminin aylık tek sıcaklık set değerleri belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'te verilmiştir. Aylık set sıcaklıkları,

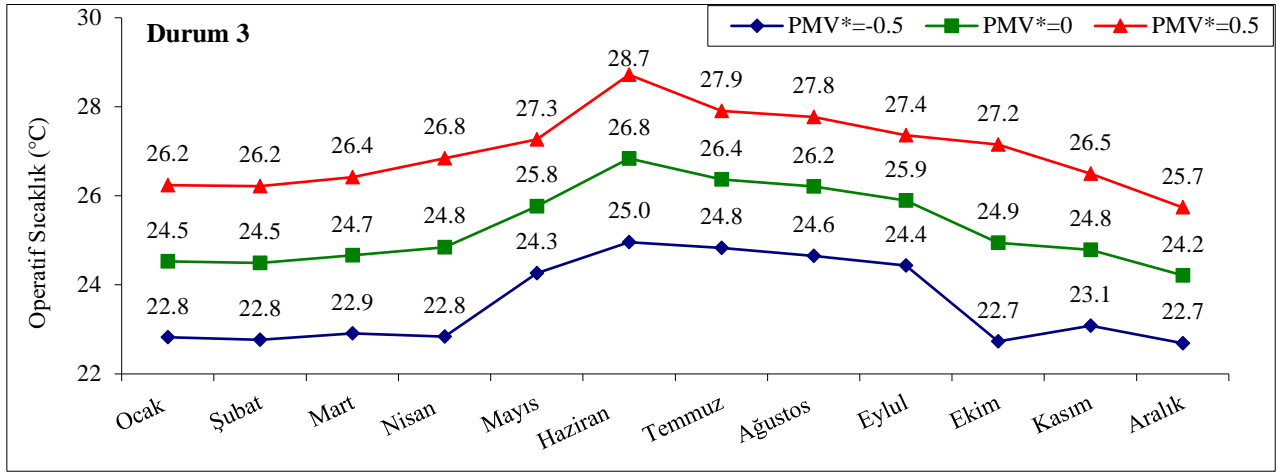
Durum 1 için $24,5-26,0^{\circ}C$ (operatif), Durum 2 için $24,5-26,2^{\circ}C$ (hava) ve Durum 3 için $24,2-26,8^{\circ}C$ (operatif), arasında değişmektedir. Her üç Durum için belirlenen set sıcaklık aralıkları birbirleri ile yaklaşık aynı görünmesine rağmen, Şekil 3, 4 ve 5'ten açıkça görüldüğü üzere Durum 2'de belirlenen set sıcaklıklarının eğilimi, Durum 1 ve Durum 3'e göre farklılık göstermektedir. Bunun nedeni Durum 2'de hava sıcaklık set değerlerinin kullanılmasının olduğu düşünülmektedir. Hava set sıcaklık değerinin kullanılması ile operatif sıcaklık değerlerine göre set sıcaklık değerlerinde mevsimsel farklılıklar oluşmaktadır. Yani ısıtma dönemlerinde set sıcaklıkları artarken, soğutma dönemleri için sıcaklıkların düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 3. Durum 1 operatif sıcaklık set değerleri ($^{\circ}C$) (Case 1 operative temperature set values ($^{\circ}C$))



Şekil 4. Durum 2 hava sıcaklığı set değerleri ($^{\circ}C$) (Case 2 air temperature set values ($^{\circ}C$))



Şekil 5. Durum 3 operatif sıcaklık set değerleri (°C) (Case 3 operative temperature set values (°C))

Durum 4 için, ölü bantlı çift sıcaklık modunda birincil set sıcaklığı olarak kesikli rejimde PMV=0 yapan operatif sıcaklıklar, ikincil set sıcaklıkları için ısıtmada PMV'yi -0,5, soğutmada ise PMV'yi +0,5 yapan operatif sıcaklık değerleri kullanılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır. Örnek olarak Şekil 3'de İzmir ili için Eylül ayı ısıtma/soğutma birincil set sıcaklığı 26,0°C, ikincil set sıcaklıkları ısıtma için 24,5°C, soğutma için 27,5°C alınmıştır. Durum 4 için ölü bantlı çift sıcaklık değerleri, HVAC sistemi ısıtma sezonunda 24,5-26°C, soğutma sezonunda ise 26,0-27,5°C olarak alınmıştır.

Durum 5 için De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak aylık alt ve üst sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1 ve 2'ye göre hesaplanmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

4.2. PMV Değerleri ve İstatistiksel Değerlendirme (PMV Values and Statistical Evaluation)

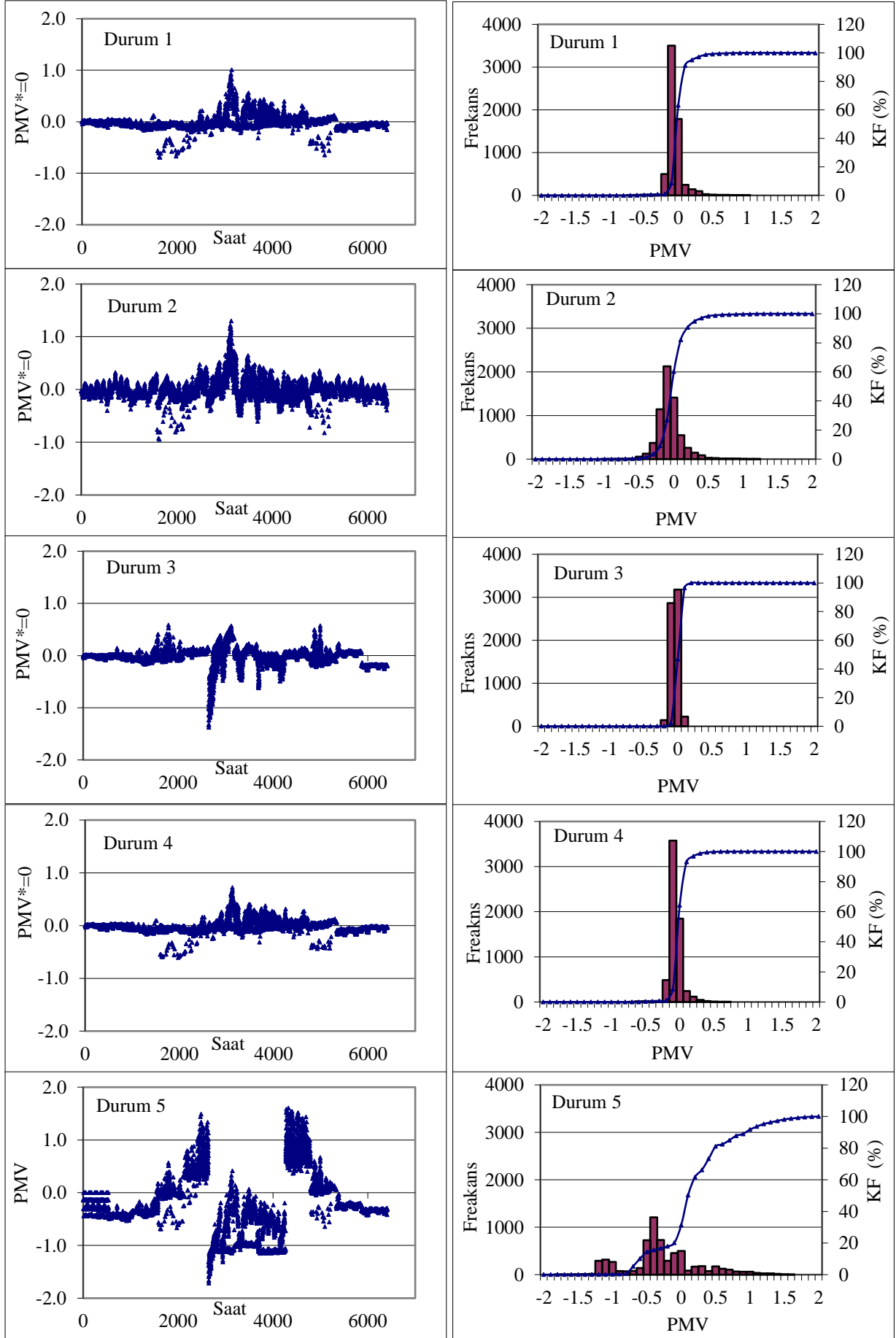
Durum 1, 2 ve 3 için PMV=0 yapan tek sıcaklık set değerleri, Durum 4 ve 5 için de belirlenen çift sıcaklık set değerleri kullanılarak çalıştırılan simülasyonlarda ailenin konutta bulunduğu saatler için elde edilen saatlik PMV değerleri (çıkış verisi) Şekil 6'da verilmiştir. Saatlik PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi sonucu PMV dağılım frekansları ve kümülatif frekansları da Şekil 6'da, dağılım özellikleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Durum 5 alt ve üst operatif sıcaklık set değeri (°C) (Case 3 lower and upper operative temperature set values (°C)).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
ASL	18,1	17,9	18,6	19,8	21,8	22,9	23,3	23,2	22,4	20,6	18,8	18,3
ÜSL	23,1	22,9	23,6	24,8	26,8	27,9	28,3	28,2	27,4	25,6	23,8	23,3

Tablo 4. Saatlik PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi (Statistical evaluation of hourly PMV values)

	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5
Ortalama	-0,0087	-0,012	-0,3885	-0,0156	-0,224
Ortakdaki değer	-0,0299	-0,0304	-0,4205	-0,0275	-0,3022
Standard sapma	0,1167	0,1839	0,3514	0,095	0,5327
Varyans	0,0136	0,0338	0,1235	0,0090	0,2838
En küçük değer	-0,6890	-0,9464	-1,1355	-0,6062	-1,7166
En büyük değer	1,0122	1,2973	0,8669	0,7204	1,6062
Aralık	1,70	2,24	2,00	1,33	3,32
-0,2<PMV<+0,2	94,1	81,6	89,8	96,0	20,7
-0,5<PMV<+0,5	98,9	97,9	98,5	99,6	68,9



Şekil 6. Saatlik PMV değerleri ve PMV dağılım frekansları ve kümülatif frekansları (Hourly PMV values and PMV distribution frequencies and cumulative frequencies) (KF: Kümülatif Frekans)

Durum 1’de giriş verisinin $PMV=0$ olmasına rağmen, Şekil 6 ile Tablo 4’den görüleceği gibi en küçük PMV değeri $-0,6890$, en büyük PMV değeri ise $1,0122$ olup, toplamda $1,7$ PMV aralığında bir PMV dağılımı gerçekleşmiştir. Buna karşılık gelen standard sapma $0,1167$ olarak hesaplanmıştır. Tablo 4’te verilen $0,2 < PMV < +0,2$ aralığı ısı konfor açısından en yüksek beklenti seviyesini ifade etmekte olup, prEN15251 [16] standardına göre ısı konfor memnuniyet seviyesi 1. Kategori olarak adlandırılmaktadır. 1. Kategori engelli, hasta kişiler, yaşlılar ve çocukların bulunduğu hacimler için tavsiye edilir. $0,5 < PMV < +0,5$ aralığı normal beklenti seviyesine karşılık gelmekte olup, ısı konfor memnuniyet seviyesi 2. Kategori’dir.

Ailenin konutta bulunduğu saatlerin % $94,1$ ’i 1. Kategori ısı konfor memnuniyet seviyesine denk gelip, % $98,9$ ’u ise normal beklenti seviyesi olan 2. Kategori ısı konfor memnuniyet seviyesine karşılık geldiği görülmektedir. İncelenen durumlarda PMV aralığı $1,33$ (Durum 4) ile $3,32$ (Durum 5) arasında değişmektedir. En küçük aralığa sahip olan Durum 4 aynı zamanda en yüksek ısı konfor memnuniyet seviyelerine de sahip olmaktadır. Dolayısı ile PMV aralığı azaldıkça, standard sapma da azalmakta ve memnuniyet seviyesi artmaktadır (Tablo 4). Durum 4’te, Şekil 6’dan da açıkça görüleceği üzere ailenin konutta bulunduğu zamanların neredeyse tümünde PMV değeri 0 ’a çok yakındır. Benzer şekilde, en büyük PMV aralığına sahip olan Durum 5’teki saatlik PMV değerlerinin çok salınım yaptığı ve de buna bağlı olarak ısı konfor seviyelerinin çok düştüğü görülmektedir. Doğal

havalandırmaya sahip olan Durum 5, normal beklenti seviyesi % $68,9$ oranında karşılanırken, en yüksek konfor seviyesini ise ancak % $20,7$ oranında karşılamaktadır.

Kesikli ve sürekli rejimin ısı konfora etkisi Durum 1 ve Durum 3 ile ele alınmıştır. Durum 1’de ısıtma/soğutma sistemleri kesikli rejimde çalışmalarına rağmen ısı konfor memnuniyet seviyeleri, sürekli rejime göre daha yüksek çıkmıştır.

4.3. Birim Enerji Tüketimi (Unit Energy Consumption)

Durum 1, 2 ve 3 için $PMV=0$ yapan tek sıcaklık set değerleri, Durum 4 ve 5 için de belirlenen çift sıcaklık set değerleri kullanılarak çalıştırılan simülasyonlarda aylık ısıtma/soğutma enerji tüketimleri birim alan için belirlenmiştir ve Tablo 5’te verilmiştir.

Aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerleri simülasyonlarında, sürekli rejim (Durum 3) yıllık toplam birim enerji tüketim değerlerinin, kesikli rejim (Durum 1)’e göre ısıtmada % $5,52$, soğutmada ise % $10,22$ oranında arttığı görülmektedir. Soğutma enerji tüketimi artışı ısıtmaya göre daha yüksek olmaktadır.

Sürekli rejimde ölü bantlı çift sıcaklık (Durum 4) set değeri uygulaması, tek sıcaklık (Durum 3) uygulamasına göre ısıtma enerji tüketimini % $0,8$ soğutma enerji tüketimini ise % $0,63$ azaltmaktadır.

Tablo 5. Birim Enerji Tüketimi (kWh/m^2) (Unit energy consumption (kWh/m^2))

Aylar	Durum 1		Durum 2		Durum 3		Durum 4		Durum 5	
	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
Ocak	28,93	0	28,68	0	30,75	0	29,71	0	25,06	0
Şubat	26,09	0	26,14	0	27,45	0	26,64	0	22,56	0
Mart	21,02	0	20,89	0	21,74	0	21,24	0	18,37	0
Nisan	13,68	0	12,78	0	14,13	0	13,77	0	13,19	0
Mayıs	3,77	1,11	3,21	0,70	5,31	1,37	3,88	1,21	4,93	0
Haziran	0	2,33	0	1,84	0	1,97	0	2,53	0	3,68
Temmuz	0	2,75	0	2,68	0	2,92	0	3,00	0	4,07
Ağustos	0	2,38	0	2,39	0	2,78	0	2,60	0	4,01
Eylül	2,18	1,41	0,86	0	3,22	1,95	2,42	1,59	2,45	0
Ekim	12,10	0	11,23	0	11,06	0	12,24	0	11,56	0
Kasım	22,21	0	22,60	0	24,54	0	22,54	0	20,87	0
Aralık	28,89	0	28,48	0	29,44	0	33,84	0	26,30	0
TOPLAM	158,87	9,98	154,86	7,60	167,63	11,00	166,29	10,93	145,29	11,77

I: Isıtma, S: Soğutma

Konutta tüketilen doğalgaz yıllık enerji tüketimi 1,15, elektrik yıllık enerji tüketimi 2,8 birincil enerji dönüşüm faktörü ile çarpılarak yıllık ısıtma/soğutma birincil enerji tüketimi hesaplanır [52]. Tüm durumlar için hesaplamalar Tablo 6’da listelenmiştir.

Tablo 6. Yıllık birincil birim enerji tüketimi (kWh/m²)
(Annual primary unit energy consumption (kWh/m²))

	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5
Isıtma	182,69	178,08	192,78	191,23	167,08
Soğutma	27,94	21,28	30,81	30,59	32,94
Toplam	210,64	199,36	223,58	221,83	200,03

Tablo 6’dan görüldüğü üzere, yıllık birincil birim enerji tüketimi (YBBET) 199,36-223,58 kWh/m² arasında bulunmuştur. Fakat her bir durumun ısı konforu karşılama yüzdeleri veya diğer bir deyişle ısı konfor seviyeleri kümülatif frekans yüzdeleri (IKSKFY) farklıdır. Bu nedenle ele alınan durumları enerji tüketimleri açısından daha mantıklı bir şekilde karşılaştırmak için durumların YBBET değerinin, IKSKFY değerine bölünmesi ile birim memnuniyet enerji tüketimi (BMET) değeri hesaplanmış ve Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7. Birim memnuniyet enerji tüketimi
(kWh/m²/%KF) (Unit satisfaction energy consumption
(kWh/m²/%KF))

	-0,2<PMV<+0,2	-0,5<PMV<+0,5
Durum 1	2,24	2,13
Durum 2	2,44	2,04
Durum 3	2,49	2,27
Durum 4	2,31	2,23
Durum 5	9,66	2,90

KF: Kümülatif frekans

Isıl konfor için normal beklenti seviyesinde Durum 2’nin en düşük BMET değerine (2,04 kWh/m²/%KF) sahip olduğu, doğal havalandırılmalı olan Durum 5’in ise en yüksek BMET değerine (2,90 kWh/m²/%KF) sahip olduğu görülmektedir. Diğer yandan kesikli rejime sahip Durum 1’in 2,13 kWh/m²/%KF BMET değeri ile, sürekli rejimin (Durum 3) 2,27 kWh/m²/%KF BMET değerine göre daha az enerji tükettiği gözlenmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada İzmir ilindeki bir konut için ısıtma/soğutma sistemlerinin çalışma şartlarının, ısı konfor koşulları ile enerji tüketimlerine etkisi analiz edilmiştir. ISO 13790 [53]’a göre dinamik simülasyon yöntemlerinden olan EnergyPlus ve arayüz olarak Design Builder kullanılarak birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir:

Çalışma sonuçları aşağıdaki gibi yorumlanabilir:

- PMV=0 için aylık set sıcaklıkları, tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerli Durum 1 için 24,5-26,0°C (operatif), tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değerli Durum 2 için 24,5-26,2°C (hava) ve tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerli Durum 3 için 24,2-26,8°C (operatif), arasında değişmektedir. Her ne kadar sıcaklık aralıkları aynı görünse de, hava set sıcaklık değerinin kullanılması ile operatif sıcaklık değerlerine göre set sıcaklık değerlerinde mevsimsel farklılıklar oluşmaktadır. Yani ısıtma dönemlerinde set sıcaklıkları artarken, soğutma dönemleri için sıcaklıkların düştüğü gözlenmektedir. Diğer bir deyişle, verilen sıcaklık aralıklarındaki minimum değerler operatif set sıcaklıkları için ısıtma dönemine denk gelirken, hava sıcaklık set değerleri için soğutma dönemine denk gelmektedir.
- İncelenen durumlar arasında tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerine sahip olan Durum 4, 1,33 PMV aralığı ile en düşük, doğal havalandırılmalı, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerli Durum 5 ise 3,32 PMV aralığı ile en yüksek PMV aralığına sahiptir.
- PMV aralığı azaldıkça, standard sapma da azalmakta ve memnuniyet seviyesi de artmaktadır.
- İncelenen durumların yıllık birincil birim enerji tüketimi (YBBET) 199,36-223,58 kWh/m² arasında değişmektedir.

- Durum 4'te 221,83 kWh/m² yıllık birincil birim enerji tüketimi ile beklenti seviyesi % 99,6 oranında karşılanırken, en yüksek konfor seviyesinin ise ancak % 96 oranında karşılanmaktadır
- Durum 5, 200,03 kWh/m² yıllık birincil birim enerji tüketimi ile normal beklenti seviyesi % 68,9 oranında karşılanırken, en yüksek konfor seviyesinin ise ancak % 2 0,7 oranında karşılanmaktadır.
- Sürekli rejimde HVAC sistemi tüm gün boyunca çalıştırılmaktadır. Bu durumda operatif sıcaklık set değerleri hemen hemen aynı olmakla birlikte kesikli rejime göre enerji tüketimi artmaktadır. Birincil enerji tüketimleri karşılaştırıldığında ısıtmada % 10,1 artış ve soğutma enerjisi tüketimindeki % 6,6 düşüş olmaktadır.
- PMV=0'ı sağlayan kesikli rejimde tek operatif (Durum 1) ve hava sıcaklıkları set değerleri (Durum 2) için elde edilen yıllık birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri karşılaştırıldığında, operatif sıcaklık set değerlerinde hava sıcaklığına göre ısıtma enerji tüketimi % 2,5, soğutma enerji tüketimi ise % 23,8 daha yüksek olarak belirlenmiştir. Soğutma enerjisi tüketimindeki artışın ısıtma enerjisi tüketimine göre çok yüksek olması, radyasyon sıcaklığının etkisini ortaya koymaktadır.
- Sürekli rejimde ölü bantlı çift sıcaklık set değeri (Durum 4) uygulamasında, tek operatif set değeri (Durum 3) uygulamasına göre hem ısıtma hem de soğutma enerji tüketiminde çok önemli bir değişim görülmemekle birlikte, ısı konfor seviyeleri açısından Durum 4 daha iyidir.
- Isıl konfor seviyesinin % 1'lik kümülatif frekans değerinin sağlanabilmesi için harcanması gereken yıllık birincil birim enerji tüketimini ifade eden birim memnuniyet enerji tüketimi, ısı konfor için normal beklenti seviyesinde Durum 2'de en düşük değere sahip olurken, doğal havalandırılmalı olan Durum 5'in ise en yüksek birim memnuniyet enerji tüketimine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç gerekli ısı konfor seviyesinin sağlanabilmesi için Durum 5'te daha fazla enerji harcanması gerektiği sonucunu ortaya koymaktadır.

- İncelenen tüm durumlar arasında normal beklenti seviyesinde ısı konforu en çok sağlayan Durum 4 iken, ısı konfor seviyesinin % 1'lik kümülatif frekans değerinin sağlanması için en az enerji tüketen ise Durum 2 olarak belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Projeyi maddi olarak destekleyen Türk Tesisat Mühendisleri Derneği (TTMD)'ne ve çok sayıdaki simülasyon verilerini derleyebilmemiz için yardımcı programlar yazan Orhan Özcan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] DIRECTIVE 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings, 2002.
- [2] Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, EN ISO 7730, 2005.
- [3] Ventilation for Buildings - Design Criteria for the Indoor Environment, CR 1752, 1998.
- [4] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE, Standard 55-2013, Atlanta, GA, USA, 2013.
- [5] Kalorifer Tesisatı Projelendirme Kuralları, TS 2164, 1988.
- [6] S. P. Corngati , E. Fabrizio ve . M. Filippi, "The impact of indoor thermal conditions, system controls and building types on the building energy demand," *Energy and Buildings*, cilt 40, pp. 627-636, 2008.
- [7] K. Yang ve C. Su, "An approach to building energy savings using the PMV index," *Building and Environment*, cilt 32, no. 1, pp. 25-30, 1997.
- [8] T. H. Karyono, "Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta - Indonesia," *Building and Environment*, cilt 35, no. 1, pp. 77-90, 2000.

- [9] W. Hanqing, H. Chunhua, L. Zhiqiang, T. Guangfa, L. Yingyun ve W. Zhiyong, "Dynamic evaluation of thermal comfort environment of airconditioned buildings," *Building and Environment*, cilt 41, no. 11, pp. 1522-1529, 2006.
- [10] K. W. Tham ve M. B. Ullah, "Building energy performance and thermal comfort in Singapore," *ASHRAE Transactions*, cilt 99, no. 1, pp. 308-321, 1993.
- [11] R. Holz, A. Hourigan, R. Sloop, P. Monkman ve M. Krarti, "Effects of standard energy conserving measures on thermal comfort," *Building and Environment*, cilt 32, no. 1, pp. 31-43, 1997.
- [12] J. F. Karlsson ve B. Moshfegh, "Energy demand and indoor climate in a low energy building-changed control strategies and boundary conditions," *Energy and Buildings*, cilt 38, pp. 315-326, 2005.
- [13] R. Becker, I. Goldberger ve M. Paciuk, "Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation," *Building and Environment*, cilt 42, pp. 3261-3276, 2007.
- [14] H. Jamil, J. Sanjayan, J. Wilson ve M. Alam, "Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building," *Energy and Buildings*, cilt 133, p. 217-229, 2016.
- [15] N. Delgarm, S. Delgarm ve B. Sajadia, "Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony(ABC)," *Energy and Buildings*, cilt 131, p. 42-53, 2016.
- [16] Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, prEN 15251, 2007.
- [17] P. O. Fanger, *Thermal Comfort Analyses and Applications in Environmental Engineering*, London: McGraw-Hill, 1970.
- [18] K. Van der Linden, A. C. Boerstra, A. K. Raube ve S. R. Kurvers, "Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response," *Energy and Buildings*, cilt 34, pp. 737-744, 2002.
- [19] J. Huh ve M. J. Brandemuehl, "Optimization of air-conditioning system operating strategies for hot and humid climates," *Energy and Buildings*, cilt 40, pp. 1202-1213, 2008.
- [20] B. Olesen, "The philosophy behind EN 15351: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings," *Energy and Buildings*, cilt 39, pp. 740-749, 2007.
- [21] F. Butera, "Principles of thermal comfort," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 2, p. 39-66, 1998.
- [22] M. S. Jang, C. D. Koh ve I. S. Moon, "Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels," *Building and Environment*, cilt 42, p. 55-61, 2007.
- [23] K. H. Yang ve C. H. Su, "An approach to building energy savings using the PMV index," *Building and Environment*, cilt 32, no. 1, pp. 25-30, 1997.
- [24] F. Sehar, M. Pipattanasomporn ve S. Rahman, "Integrated automation for optimal demand management in commercial buildings considering occupant comfort," *Sustainable Cities and Society*, cilt 28, p. 16-29, 2017.
- [25] R. J. De Dear ve G. S. Brager, "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference," *ASHRAE Transactions*, cilt 104, no. 1A, pp. 145-167, 1998.
- [26] L. Peeters, R. De Dear, J. Hensen ve W. D'haeseleer, "Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation," *Applied Energy*, cilt 86, no. 5, pp. 772-780, 2009.
- [27] A. C. Van der Linden, A. C. Boerstra, A. K. Raue, S. R. Kurvers ve R. J. De Dear, "Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands. A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate," *Energy and Buildings*, cilt 38, pp. 8-17, 2006.

- [28] G. S. Brager ve R. J. De Dear, "Thermal adaptation in the built environment: a literature review," *Energy and Building*, cilt 17, pp. 83-96, 1998.
- [29] R. A. Memon, S. Chirarattananon ve P. Vangtook, "Thermal comfort assessment and application of radiant cooling: A case study," *Building and Environment*, cilt 43, pp. 1185-1196, 2008.
- [30] S. Kumar, J. Mathur, S. Mathur, M. K. Singh ve V. Loftness, "An adaptive approach to define thermal comfort zones on psychrometric chart for naturally ventilated buildings in composite climate of India," *Building and Environment*, cilt 109, pp. 135-153, 2016.
- [31] O. Fanger ve J. Toftum, "Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates," *Energy and Buildings*, cilt 34, pp. 533-536, 2002.
- [32] S. A. Damiati, S. A. Zaki ve H. B. Rija, "Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid Season," *Building and Environment*, cilt 109, pp. 208-22, 2016.
- [33] F. Ş. Sezer, "Sağlık Ocaklarında Konfor Koşullarının Değerlendirilmesi: Bursa/Nilüfer Örneği," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 28, no. 1, pp. 197-208, 2015.
- [34] E. Z. E. Conceicao ve M. Lucio, "Thermal study of school buildings in winter conditions," *Building and Environment*, cilt 43, pp. 782-792, 2008.
- [35] A. Al-Mumin, O. Khattab ve G. Sridhar, "Occupants' behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences," *Energy and Buildings*, cilt 35, pp. 549-559, 2003.
- [36] M. Soleimani-Mohseni, B. Thomas ve P. Fahlen, "Estimation of operative temperature in buildings using artificial neural networks," *Energy and Buildings*, cilt 38, pp. 635-640, 2006.
- [37] Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, TS 825, 2008.
- [38] N. Eskin ve H. Turkmen, "Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey," *Energy and Buildings*, cilt 40, p. 763-773, 2008.
- [39] M. N. Inanici ve F. N. Demirbilek, "Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey," *Building and Environment*, cilt 35, pp. 41-52, 2000.
- [40] A. Uçar ve F. Balo, "Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey," *Applied Energy*, cilt 86, pp. 730-736, 2009.
- [41] K. O. Oral ve Z. Yılmaz, "Building form for cold climatic zones related to building envelope from heating energy conservation point of view," *Energy and Buildings*, cilt 35, p. 383-388, 2003.
- [42] M. Yaman, Energy efficiency in a university building: Energy performance assessment of IZTECH Administrative Building, İzmir: MSc. Thesis, Izmir Institute of Technology, 2009.
- [43] C. Coşkun ve Z. Oktay, "Energy audit of a University Building in energy saving perspective," *Seminar of Energy Performance of Buildings, Proceedings of TESKON 2009*, Izmir, 2009.
- [44] N. Arslanoğlu ve Y. Abdulvahap, "The Effect Of Different Indoor Air Velocities and Temperatures On Thermal Comfort," *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, cilt 31, no. 2, pp. 95 -100, 2011.
- [45] Design Builder Software., [Çevrimiçi]. <http://www.designbuilder.co.uk>. Erişim Tarihi: 22.01.2016.
- [46] Binaların Isıl Performansı-Meskenlerde Isıtma Amacıyla Kullanılan Enerjinin Hesaplanması, TS EN 832, 2007.
- [47] D. B. Crawley, L. Lawrie ve C. Pedersen, "EnergyPlus: creating a new generation building energy simulation program," *Energy and Buildings*, cilt 33, no. 4, pp. 319-331, 2001.
- [48] EnergyPlus Engineering Reference. "The Reference to EnergyPlus Calculations," [Çevrimiçi]. <https://energyplus.net/sites/default/files/pd>

[fs_v8.3.0/EngineeringReference.pdf](#).

Erişim Tarihi: 22.01.2016.

- [49] ASHRAE, Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations,» *ASHRAE Handbook Fundamentals*, Atlanta, ASHRAE, Chapter 30, 2005.
- [50] S. J. Rees , M. G. Davies, J. D. Spitler ve P. Haves, “Qualitative comparison of North American and U.K. cooling load calculation methods,” *HVAC&Research*, cilt 6, pp. 75-99, 2000.
- [51] Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs, ANSI/ASHRAE 140, 2007.
- [52] The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings, 2005 Ed., Revision 1, Version 9.81, SAP2005, 2008.
- [53] Energy Performance of buildings - Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling, ISO 13790, 2008.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 15.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 22.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.292296	

Isıl konfor sıcaklıklarına bağlı olarak bir konutun enerji performansının değerlendirilmesi: İzmir örneği

Nurdan Yıldırım^{*1}, Ebru Kuzgunkaya², Gülden Gökçen Akkurt³

ÖZ

Türkiye’de enerji tüketiminin yaklaşık %34’ü binalarda ve bunun %85 kadarı da ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılmaktadır. Binalarda bulunan HVAC sistemlerinin işletme özellikleri, hem binanın ısıl konforunu hem de enerji tüketimlerini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, HVAC sistemlerinin işletme şartlarının, ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimlerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla İzmir ilindeki 100 m²’lik bir konut için öngörülen HVAC sisteminin kesikli ve sürekli rejimde, tek ve çift sıcaklık set değerleri ile tam mekanik kontrollü veya doğal havalandırılmalı olarak çalıştırılması durumları incelenmiştir.

Isıl konfordan olan memnuniyet; Tahmini Ortalama Oy (Predicted Mean Vote - PMV) değeri ile ifade edilmektedir. Bu kapsamda öncelikle, Design Builder yazılımı kullanılarak en iyi duruma karşılık gelen PMV=0’a göre HVAC sisteminin set sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu sıcaklık set değerlerinin kullanılması ile ele alınan 5 farklı durumda konut için yıllık birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen 5 durum arasında normal beklenti seviyesinde % 99,6 kümülatif frekans yüzdesi ile ısıl konforu en çok sağlayan tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerli durumdur. Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değerli durum ise 2,04 kWh/m²/%KF birim memnuniyet enerji tüketimi değeri ile en az enerji tüketen durum olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: ısıl konfor, enerji tüketimi, PMV, Fanger ve adaptif metod

* Corresponding Author

¹ Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, nurdan.yildirim@yasar.edu.tr

² İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi, ebrukuzgunkaya@iyte.edu.tr

³ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, guldengokcen@iyte.edu.tr

Energy performance assessment of a residential house based on thermal comfort temperatures: Izmir sample

ABSTRACT

34% of the energy consumption in Turkey belongs to buildings and around 85 % of this consumption is utilized for heating purposes. The operating characteristics of the HVAC systems in buildings directly affect both the building's thermal comfort and energy consumption. This study aims to determine the effect of operating conditions of the HVAC system on thermal comfort and energy consumption of residential buildings. For this purpose, the HVAC system for a 100 sqm residence in İzmir city has been investigated according to the single and double temperature set values at continues and intermittent operating modes for fully mechanically control or natural ventilation conditions.

Thermal comfort satisfaction is expressed by PMV value. In this context, primarily the set temperatures of the HVAC system are determined for $PMV = 0$ which represents the best case of thermal comfort by using Design Builder software. Annual specific heating/cooling energy consumption, annual primer specific energy consumption, hourly PMV values during occupancy hours and statistical evaluation of these PMV values of a residential house are realized for considered 5 different operating conditions of HVAC system by using determined temperature set values. According to the obtained results, among 5 cases, the case with fully mechanical controlled, continuous regime, monthly dual heating/cooling operative set values, provides the maximum thermal comfort for normal expectation level of the thermal comfort with a cumulative frequency of 99,6%. The case, with fully mechanical controlled, intermittent regime, monthly single heating/cooling operative set values, consumes the minimum energy with specific satisfaction energy consumption of 2,04 kWh/m²/%KF.

Keywords: thermal comfort, energy consumption, PMV, Fanger and adaptive method

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Avrupa Birliği'nde binalarda enerji tüketiminin azaltılması amacıyla yayınlanan DIRECTIVE 2002/92/EC [1], her üye ülkenin binaların enerji performansının hesaplanması için bir metot geliştirmesini öngörmekte ve bu metotta enerji ihtiyaçlarının belirlenmesinde iç ısı konfor koşullarının gözetilmesini şart koşmaktadır. Binalarda ısı konfor ve iç hava kalitesinin belirlenmesine yönelik olarak kullanılan standartlar EN ISO 7730 [2], CR 1752 [3], ASHRAE 55-2013 [4] ve TS 2164 [5]'dür.

Binaların ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı/tüketimi, ısı konfor ihtiyacına bağlı olarak değişir ve bu nedenle ısı konfor seviyesinin net bir şekilde tanımlanması önemlidir. Binalarda enerji performansı ile konfor seviyesinin ilişkilendirilmesi üzerine yapılmış pek çok çalışma mevcuttur [6-15]. Isıl konfor seviyesinin sınıflandırılması ve sertifikasyonu prEN 15251 [16] standardı tarafından yapılmaktadır. Bu standart, HVAC sistem tasarımında kullanılacak

ısı konfor parametrelerinin belirlenmesinin yanısıra ölçüm ve hesaplamalardan kaynaklanan uzun vadeli ısı konfor değerlendirme metodlarını da tanımlar. Isıl konfor seviyesi 4 kategoride sınıflandırılır: I. kategori, ısı konfor açısından en yüksek beklenti seviyesini, dolayısı ile en yüksek memnuniyet seviyesini ($-0,2 < PMV < +0,2$) gösterir. Engelli, hasta kişiler, yaşlılar ve çocukların bulunduğu hacimler için tavsiye edilir. II. kategori, yeni ve tadilat görmüş binalar için kullanılır ve normal beklenti seviyesine karşılık gelir. Bu kategori için $-0,5 < PMV < +0,5$ aralığı önerilir ki standartlarda ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ısı konfor aralığıdır [2, 6, 13, 17-19] ve Beklenen Memnuniyetsizlik Yüzdesi (Predicted Percentage Dissatisfied - PPD) göstergesi % 10'un altındadır. Havalandırma Binalar için - Bina İç Ortamlar İçin Tasarım Kuralları standardı olan CR 1752 [3]'ye göre bu aralık Kategori B olarak tanımlanır.

Konfor koşulları; hava sıcaklığı, bağıl nemi ve hızının yanı sıra hacmi çevreleyen yüzeyler ile hacim içinde yer alan objelerin yüzey sıcaklıkları (ortalama radyasyon sıcaklığı) ile doğrudan

ilişkilidir. Hava sıcaklığı ile ortalama radyasyon sıcaklığının kombinasyonundan oluşan operatif sıcaklık, ısı konforunun tanımlanması için önemli bir sıcaklıktır [2], [4], [17]. İnsan vücudu operatif sıcaklığa karşı daha hassastır ve bu nedenle ASHRAE 55 [4] ve EN ISO 7730 [2]'de ısı konfor sıcaklığı olarak "operatif sıcaklık" değerleri verilmiştir. Her bir kategori için, değişen PMV aralıklarına karşılık gelen ve hacimde yaşayanların hareket düzeyi ve giyim şekline bağlı ve ısı konforunun tanımlanması için önemli bir sıcaklık olan operatif sıcaklıklar belirlenebilir [20-21].

Isı konforu ve bunun enerji tüketimi ile ilişkisi, ısı konforu sağlayan HVAC sistem stratejilerine (mekanik, doğal, hibrit) bağlı olarak analiz edilir. Bu stratejiler kullanıcı beklentileri ve davranışlarına bağlıdır. Fanger ısı konfor modeli, kullanıcı müdahalesine izin vermeyen kontrollü bir HVAC sisteminin mevcut olduğu, tamamen kapalı (doğal havalandırmanın mümkün olmadığı) bir iklim çemberinde bulunan kişiler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile geliştirilmiştir. Bu nedenle merkezi HVAC sistemi bulunan binaların ısı konforu değerlendirmeleri PMV indeksine dayanan Fanger modeli [4, 17, 22-24] ile belirlenir. Öte yandan saha çalışmaları pencerelerin açılabilmesi (doğal havalandırmanın olduğu), kullanıcı müdahalesine izin veren HVAC sistemlerinin kullanıldığı binalarda, kişilerin ısı konforunun, Fanger modelinden farklı şekilde değerlendirildiği görülmüştür. Bütünüyle mekanik olarak kontrol edilmeyen binalarda, kullanıcıların ısı konforu sıcaklığı aralığı beklentileri Fanger teorisi ile elde edilen aralığa göre daha geniştir ve kullanıcılar kendilerini psikolojik, fizyolojik ve davranışsal olarak dış ortam koşullarına adapte ederler. Bu nedenle doğal havalandırmanın olduğu binalarda "dinamik" adaptif konfor yaklaşımı kullanımı [18, 25-30] ya da genişletilmiş PMV modeli [31] önerilmektedir. Adaptif konfor yaklaşımının kullanımında "kişisel kontrol" önemlidir [32]. Kişiler giyim durumlarını ya da pencere açarak ortamın hava hızını artırarak ısı konforu koşulları kontrol edebilirler [33]. Özellikle yaz aylarında pencerelerin açılması dolayısıyla gerçekleşen doğal havalandırma ile PMV modeli ile belirlenen sıcaklıklardan daha yüksek iç hava sıcaklıklarında kişiler konforlu hissedebilmektedir. Bu da enerji tüketiminin azalması anlamına gelir [27].

İnsan vücudu operatif sıcaklığa daha hassas olmasına rağmen, operatif sıcaklığı ölçen termometrelerin pahalı ve büyük boyutlu olması,

operatif sıcaklığın hacmin farklı noktalarında farklı olması gibi nedenlerden kaynaklanan ölçüm problemleri HVAC sistem kontrollerinin hava sıcaklığına göre yapılmasına neden olmaktadır [12, 34-35]. Operatif sıcaklığın ölçülmesindeki zorluklar, ölçümü kolay olan (dış hava sıcaklığı, enerji tüketimi, zaman vb.) parametreler kullanılarak tahmin edilmesi yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu yöntemlerden biri de incelenen hacmin ya da binanın yapay sınır ağları ile modellenmesidir. Yapılan çalışmalarda ölçüm değerleri ile karşılaştırıldığında operatif sıcaklık tahminlerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür [36].

Türkiye'de binalarda enerji performansı çalışmaları, TS 825 [37]'nin zorunlu hale gelmesi ile 2000'li yıllarda başlamış olup ısıtma ve soğutma sezonlarında iç ortam set sıcaklığının sabit tutularak binaların enerji ihtiyacı/tüketimleri ile bu ihtiyaç/tüketimleri azaltacak önlemlerin simüle edilmesini içermektedir [38-41].

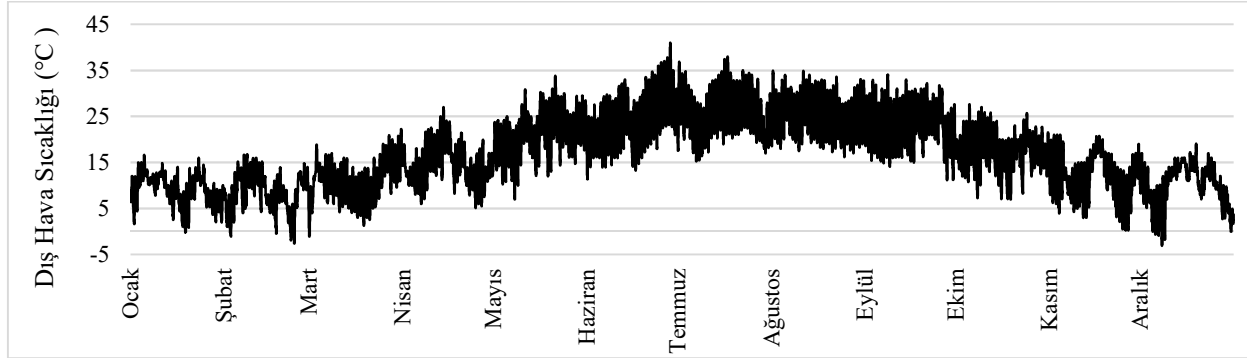
İstanbul'da bir ofis binasının ısıtma/soğutma enerji ihtiyacı EnergyPlus yazılımı ile simüle edilmiş ve bina yönetim sisteminden alınan ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı ofis binasının Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesinden seçilen İstanbul, Ankara, İzmir ve Antalya illerinde bulunması durumlarında alınabilecek enerji tasarrufu önlemleri yine EnergyPlus yardımı ile belirlenmiştir. Ofislerde iç hava sıcaklıkları ısıtma ve soğutma sezonları için set edilmiş ve bu sıcaklıklarda dış hava sıcaklıkları, yalıtım, bina görüş faktörü, dış yüzeylerin rengi, gölgeleme, ventilasyon hızı ve farklı dış hava kontrol stratejilerinin ısıtma/soğutma ihtiyacına olan etkileri belirlenmiştir [38].

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne ait bir binada ısıtma ve soğutma sezonlarında iç hava sıcaklığı sabit tutularak binanın enerji tüketimleri Ecotect ve EnergyPlus yazılımları ile belirlenmiş, ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve tüketimlerin azaltılması yönünde alınabilecek önlemler simüle edilmiştir [42]. Balıkesir Üniversitesi'nde yapılan çalışmada, üniversiteye ait bir binada enerji tüketim verileri toplanmış, tüketim değerlerinin binaya yalıtım uygulanması, kazan veriminin artırılması ve doğal aydınlatma ile gerçekleşecek enerji tasarrufu ile azaltılması ve buna bağlı olarak gerçekleşecek sera gazı emisyonlarındaki düşüş belirlenmiştir [43]. Bir diğer çalışma ise Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Isı Tekniği Laboratuvarında bulunan iklimlendirme

DesignBuilder [45] yazılımının veri tabanında Energy Plus (epw) formatında İzmir için saatlik meteorolojik veriler mevcuttur (Şekil 2).

İncelenen örnek konutta 4 kişilik bir ailenin yaşadığı ve ailenin konutta bulunduğu saatler

Tablo 2’de verildiği şekilde kabul edilmiştir. Tablo 2’ye göre aile yılın %73’ünü (6411 saat) konutta geçirmektedir. HVAC sisteminin kesikli çalışma durumundaki çalışma saatleri de ailenin konutta bulunduğu saatler göz önüne alınarak belirlenmiş ve Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. İzmir ili için Energy Plus (epw) formatında saatlik dış hava sıcaklığı (Hourly outdoor temperature in Energy Plus (epw) format for Izmir province.)

Tablo 2. Ailenin konutta bulunduğu saatler ve HVAC sistemi çalışma saatleri (kesikli) (Occupancy hours and operating hours of HVAC system).

Ailenin konutta bulunduğu saatler	Hafta içi	Hafta sonu	
	18:00-08:00	Tüm gün	
	18:00-08:00	Tüm gün	
Çalışma rejimi	Isıtma	17:00-08:00	Tüm gün
	Soğutma	18:00-24:00	11:00-24:00

- Ailenin konutta bulunma durumuna bağlı olarak değişen metabolik kazançlar, cihaz kullanımı ve aydınlatmadan kaynaklanan iç ısı kazançları TS EN 832 [46]’ye göre konut ortalaması 5 W/m² olacak şekilde belirlenmiştir.

3. YÖNTEM (METHOD)

Çalışmada yapılan başlıca kabuller ve alınan değerler aşağıda listelenmiştir:

- Konuttaki insan yoğunluğu 0,04 kişi/m²’dir.
- Simülasyonlarda, ısıl konforu etkileyen iç mekan iklimsel parametrelerinden olan hava hızı 0,1 m/s’den düşük olarak kabul edilmiş, kişisel parametrelerden olan konut içindeki aktivite seviyesi ise 0,9 met olarak sabit tutulmuştur.
- Çalışmada sıcak su ve aydınlatma enerji tüketimleri dikkate alınmamış, sadece ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri incelenmiştir.
- Konutta ısıtma sistemi olarak doğal gaz yakıtlı kazan ve sıcak sulu radyatör sistemi, soğutma sistemi olarak da klima kullanımı öngörülmüştür.
- Konutun ısıtma/soğutma enerji tüketiminin belirlenmesinde doğal gaz ile klimaların elektrik tüketimi dikkate alınmıştır.
- Isıtma/soğutma sisteminde kullanılan fan, pompa vb. yardımcı ekipmanların tüketimi elektrik tüketimine dahil edilmemiştir.
- Isıtma sistem verimi %85, soğutma sistemi COP değeri 3 olarak alınmıştır.

Konutun ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimi arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için, örnek konutun ısıtma/soğutma sistemi, kesikli ve sürekli çalışma rejimi benimsenerek EnergyPlus yazılımında aylık olarak simüle edilmiştir.

EnergyPlus, 2001 yılında ABD Enerji Bakanlığı [47] tarafından geliştirilmiş modüler bir yazılımdır. İki yılda bir yenilenir ve BLAST ile DOE-2’nin en iyi özelliklerinin birleşiminden oluşur. Yazılım ASHRAE Isıl Denge Metodu’nu kullanır. Isıl Denge Metodu; saatlik-dinamik bir metot olup güneş kazançları ve iç kazançların detaylı hesaplanması, iç yüzey sıcaklıklarının her yüzey için ayrı ayrı tanımlanması, doğal havalandırma, gölgeleme, HVAC ekipmanları ve ısıl kütlelerin dahil edilmesi ile fiziksel duruma en yakın ve kabullerin en aza indirildiği, dolayısı ile de gerçeğe en yakın sonuçları verir [48-50]. EnergyPlus, ANSI/ASHRAE 140 [51] doğrulamasına sahiptir.

Bu çalışmada, HVAC sistemleri Fanger ısıl konfor modeline göre tam mekanik kontrollü ve De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak doğal havalandırılmalı olacak

şekilde 2 ana kategoride ele alınmış olup, sıcaklık set değerlerine göre ise 5 alternatif durum için simülasyonlar yapılmıştır. Eğer ısıtma/soğutma sistemleri tek bir sıcaklığa göre değil, belirli bir sıcaklık aralığına göre çalıştırılıyorsa ölü bantlı çift sıcaklık set değeri olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda çalışmada ele alınan simülasyonlar;

- Durum 1: Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 2: Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değeri
- Durum 3: Tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 4: Tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 5: Doğal havalandırılmalı, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri

Simulasyonlarda, mekanik kontrollü HVAC sistemlerinde öncelikli olarak operatif termostat bir diğer alternatif olarak hava sıcaklığı set değerleri kullanılmıştır.

Durum 4 olarak adlandırılan alternatifte HVAC sistemleri için iki farklı operatif sıcaklık set değerleri (ölü bantlı çift sıcaklık set değeri) belirlenerek HVAC sistemlerinin bu iki sıcaklık değeri arasında simülasyonları yapılmıştır.

Doğal havalandırmaya dolayısı ile kişisel kontrole izin verilen adaptif konfor yaklaşımında De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak alt ve üst operatif sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

3.1. Sıcaklık set değerlerinin belirlenmesi (Determination of Temperature Set Values)

Her bir simülasyon adımında aylık olarak; ASHRAE 55-2013 [4] ve ISO 7730 [2]'da verilen 19,0-26,5°C ısıtma, 23,5-28,0°C soğutma operatif sıcaklık aralıkları için 1°C'lik sıcaklık adımlarında konut simüle edilmiş ve aylık ortalama PMV değerleri belirlenmiştir. Set sıcaklıkları ile aylık ortalama PMV değerlerinin lineer olarak değiştiği gözlenmiştir. Dolayısı ile simüle edilen her bir ay için Set Sıcaklığı-PMV eğrileri oluşturularak -

0,5<PMV<+0,5 konfor aralığında PMV'yi -0,5, 0 ve +0,5 yapan aylık sıcaklık (operatif, hava) set değerleri belirlenmiştir.

Ölü bantlı çift sıcaklık set değerinin belirlenmesi için kesikli rejimde PMV=0 yapan operatif set sıcaklıkları simülasyonda ölü bantlı çift sıcaklık modunda birincil set sıcaklığı olarak kullanılmıştır. İkincil set sıcaklıkları için ısıtmada PMV'yi -0,5, soğutmada ise PMV'yi +0,5 yapan operatif sıcaklık değerleri kullanılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır.

Doğal havalandırma için %90 kabul edilebilir alt ve üst, operatif sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1 ve 2'de olduğu gibi belirlenir [18, 25-29].

$$\text{ÜSL (üst sıcaklık limiti)} = 0,31 * T_0 + 20,3 \quad (1)$$

$$\text{ASL (alt sıcaklık limiti)} = 0,31 * T_0 + 15,3 \quad (2)$$

$T_0 =$ Dış hava sıcaklığı (°C)

3.2. Saatlik PMV Değerlerinin Belirlenmesi ve İstatistiksel Değerlendirme (Determination of Hourly PMV Values and Statistical Evaluation)

Bir yıl için PMV=0 yapan set sıcaklıkları simülasyonlarda giriş verisi olarak kullanılmış ve ailenin konutta bulunduğu saatler için çalıştırılan simülasyonlardan elde edilen saatlik PMV değerleri çıkış verisi olarak elde edilmiştir. Yıl boyunca elde edilen saatlik PMV değerleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Frekans dağılımları ve dağılım özellikleri (ortalama değer, orta değer, standard sapma, varyans, en küçük değer, en büyük değer ve aralık) ile ailenin konutta bulunduğu saatlerin % kaçının -0,2<PMV<+0,2 ve -0,5<PMV<+0,5 konfor aralıklarına düştüğü belirlenmiştir.

4. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

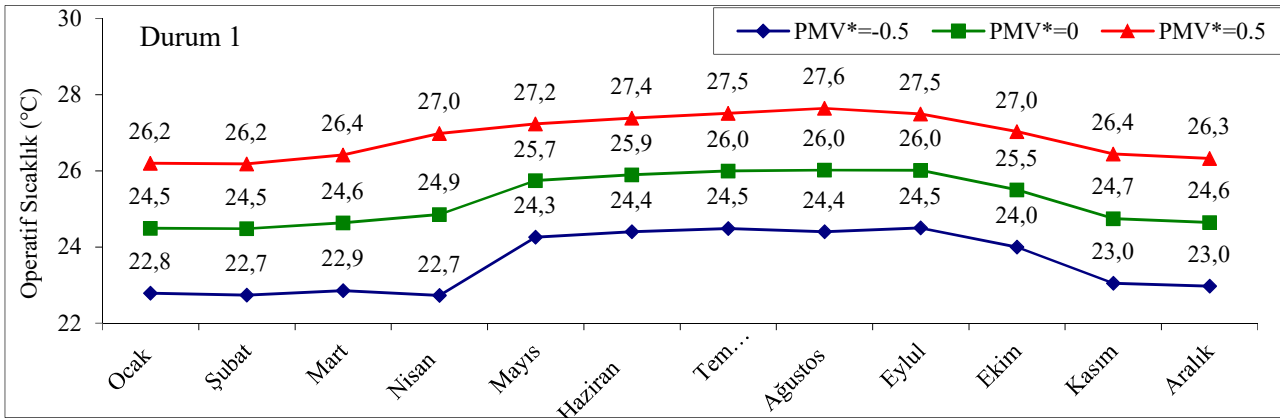
İzmir ilindeki bir konut için ısıtma/soğutma sistemlerinin çalışma şartlarının, ısı konfor koşulları ile enerji tüketimlerine etkisi 5 farklı durum analiz edilmiştir. Dinamik simülasyon yöntemlerinden olan EnergyPlus ve arayüz olarak Design Builder kullanılarak yapılan toplam 540 simülasyon ile öncelikle ısıtma/soğutma sistemlerinin sıcaklık set değerleri belirlenerek,

daha sonra elde edilen bu set değerlerinin kullanılması ile her bir durumun birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, yıllık birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir:

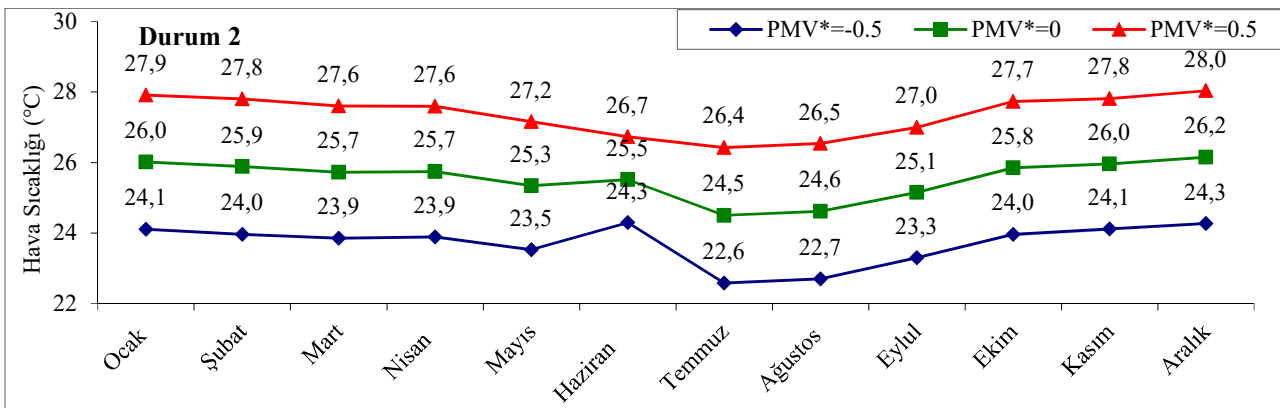
4.1. Sıcaklık Set Değerlerinin Belirlenmesi (Determination of Temperature Set Values)

Durum 1, 2 ve 3 için $PMV=-0,5$, 0 ve $+0,5$ 'i sağlayan ısıtma/soğutma sisteminin aylık tek sıcaklık set değerleri belirlenmiş ve sırasıyla şekil 3, 4 ve 5'te verilmiştir. Aylık set sıcaklıkları,

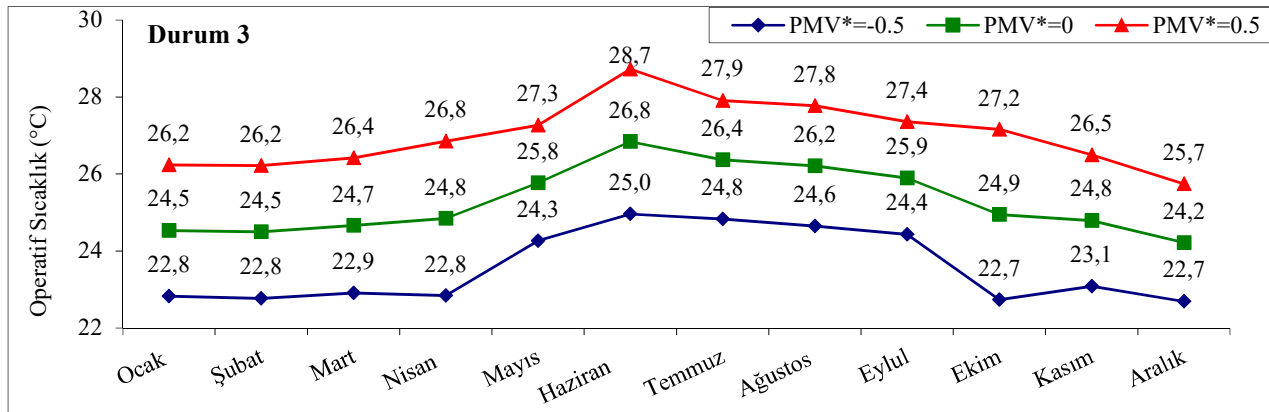
Durum 1 için $24,5-26,0^{\circ}C$ (operatif), Durum 2 için $24,5-26,2^{\circ}C$ (hava) ve Durum 3 için $24,2-26,8^{\circ}C$ (operatif), arasında değişmektedir. Her üç Durum için belirlenen set sıcaklık aralıkları birbirleri ile yaklaşık aynı görünmesine rağmen, şekil 3, 4 ve 5'ten açıkca görüldüğü üzere Durum 2'de belirlenen set sıcaklıklarının eğilimi, Durum 1 ve Durum 3'e göre farklılık göstermektedir. Bunun nedeni Durum 2'de hava sıcaklık set değerlerinin kullanılmasının olduğu düşünölmektedir. Hava set sıcaklık değerinin kullanılması ile operatif sıcaklık değerlerine göre set sıcaklık değerlerinde mevsimsel farklılıklar oluşmaktadır. Yani ısıtma dönemlerinde set sıcaklıkları artarken, soğutma dönemleri için sıcaklıkların düştüğü gözlenmektedir.



şekil 3. Durum 1 operatif sıcaklık set değerleri ($^{\circ}C$) (Case 1 operative temperature set values ($^{\circ}C$))



şekil 4. Durum 2 hava sıcaklığı set değerleri ($^{\circ}C$) (Case 2 air temperature set values ($^{\circ}C$))



Şekil 5. Durum 3 operatif sıcaklık set değerleri (°C) (Case 3 operative temperature set values (°C))

4.2. PMV Değerleri ve İstatistiksel Değerlendirme (PMV Values and Statistical Evaluation)

Durum 4 için, ölü bantlı çift sıcaklık modunda birincil set sıcaklığı olarak kesikli rejimde PMV=0 yapan operatif sıcaklıklar, ikincil set sıcaklıkları için ısıtmada PMV'yi -0,5, soğutmada ise PMV'yi +0,5 yapan operatif sıcaklık değerleri kullanılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır. Örnek olarak Şekil 3'de İzmir ili için Eylül ayı ısıtma/soğutma birincil set sıcaklığı 26,0°C, ikincil set sıcaklıkları ısıtma için 24,5°C, soğutma için 27,5°C alınmıştır. Durum 4 için ölü bantlı çift sıcaklık değerleri, HVAC sistemi ısıtma sezonunda 24,5-26°C, soğutma sezonunda ise 26,0-27,5°C olarak alınmıştır.

Durum 5 için De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak aylık alt ve üst sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1 ve 2'ye göre hesaplanmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Durum 5 alt ve üst operatif sıcaklık set değeri (°C) (Case 3 lower and upper operative temperature set values (°C)).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran
ASL	18,1	17,9	18,6	19,8	21,8	22,9
ÜSL	23,1	22,9	23,6	24,8	26,8	27,9
	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
ASL	23,3	23,2	22,4	20,6	18,8	18,3
ÜSL	28,3	28,2	27,4	25,6	23,8	23,3

Tablo 4. Saatlik PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi (Statistical evaluation of hourly PMV values)

	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5
Ortalama	-0,0087	-0,012	-0,3885	-0,0156	-0,224
Ortakdaki değer	-0,0299	-0,0304	-0,4205	-0,0275	-0,3022
Standard sapma	0,1167	0,1839	0,3514	0,095	0,5327
Varyans	0,0136	0,0338	0,1235	0,0090	0,2838
En küçük değer	-0,6890	-0,9464	-1,1355	-0,6062	-1,7166

Durum 1, 2 ve 3 için PMV=0 yapan tek sıcaklık set değerleri, Durum 4 ve 5 için de belirlenen çift sıcaklık set değerleri kullanılarak çalıştırılan simülasyonlarda ailenin konutta bulunduğu saatler için elde edilen saatlik PMV değerleri (çıkış verisi) Şekil 6'da verilmiştir. Saatlik PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi sonucu PMV dağılım frekansları ve kümülatif frekansları da Şekil 6'da, dağılım özellikleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

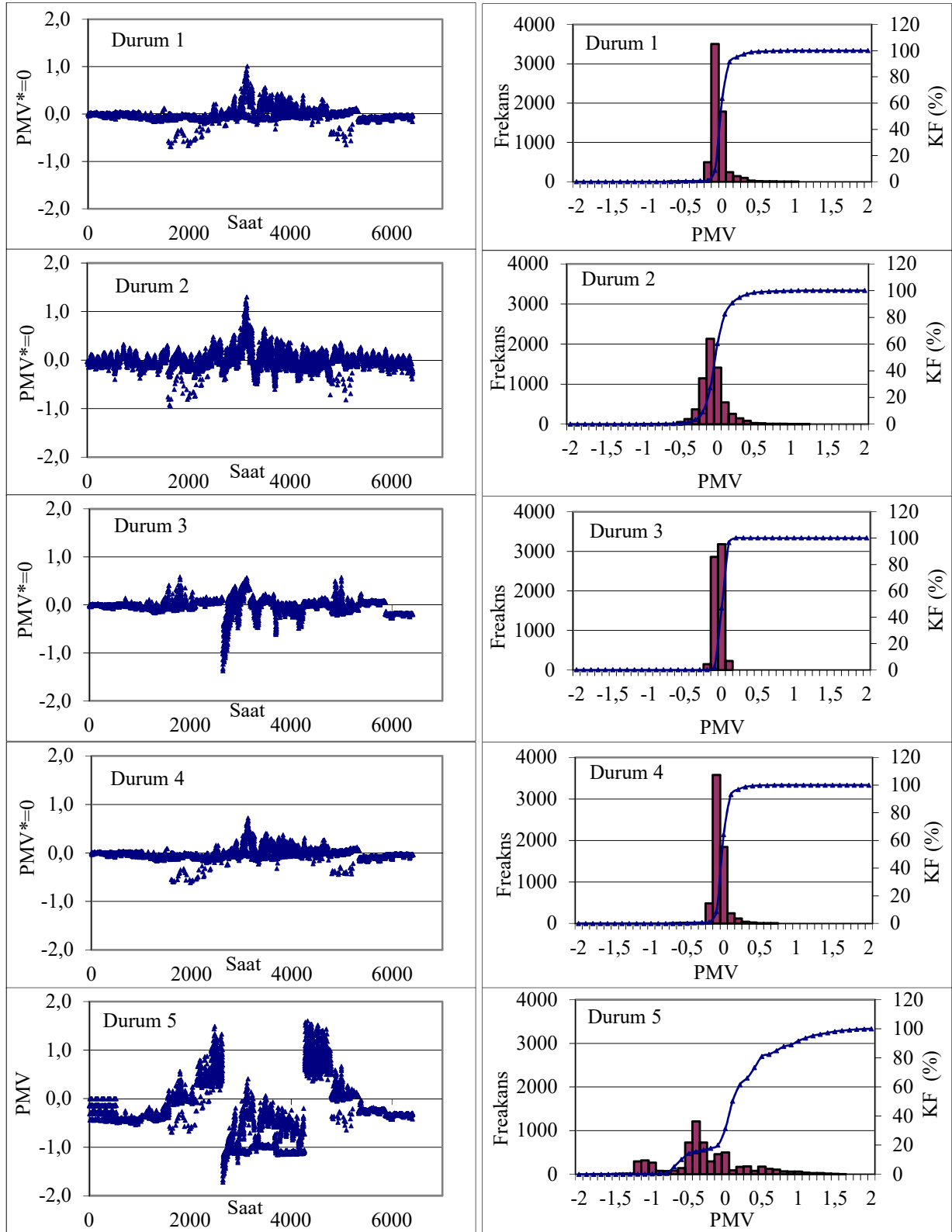
Durum 1'de giriş verisinin PMV=0 olmasına rağmen, Şekil 6 ile Tablo 4'den görüleceği gibi en küçük PMV değeri -0,6890, en büyük PMV değeri ise 1,0122 olup, toplamda 1,7 PMV aralığında bir PMV dağılımı gerçekleşmiştir. Buna karşılık gelen standard sapma 0,1167 olarak hesaplanmıştır. Tablo 4'te verilen $0,2 < PMV < +0,2$ aralığı ısı konfor açısından en yüksek beklenti seviyesini ifade etmekte olup, prEN15251 [16] standardına göre ısı konfor memnuniyet seviyesi 1. Kategori olarak adlandırılmaktadır. 1. Kategori engelli, hasta kişiler, yaşlılar ve çocukların bulunduğu hacimler için tavsiye edilir. $0,5 < PMV < +0,5$ aralığı normal beklenti seviyesine karşılık gelmekte olup, ısı konfor memnuniyet seviyesi 2. Kategori'dir. Ailenin konutta bulunduğu saatlerin % 94,1'i 1. Kategori ısı konfor memnuniyet seviyesine denk gelip, % 98,9'u ise normal beklenti seviyesi olan 2. Kategori ısı konfor memnuniyet seviyesine karşılık geldiği görülmektedir.

En büyük değer	1,0122	1,2973	0,8669	0,7204	1,6062
Aralık	1,70	2,24	2,00	1,33	3,32
-0,2<PMV<+0,2	94,1	81,6	89,8	96,0	20,7
-0,5<PMV<+0,5	98,9	97,9	98,5	99,6	68,9

İncelenen durumlarda PMV aralığı 1,33 (Durum 4) ile 3,32 (Durum 5) arasında değişmektedir. En küçük aralığa sahip olan Durum 4 aynı zamanda en yüksek ısı konfor memnuniyet seviyelerine de sahip olmaktadır. Dolayısı ile PMV aralığı azaldıkça, standard sapma da azalmakta ve memnuniyet seviyesi artmaktadır (Tablo 4). Durum 4'te, Şekil 6'dan da açıkça görüleceği üzere ailenin konutta bulunduğu zamanların neredeyse tümünde PMV değeri 0'a çok yakındır. Benzer şekilde, en büyük PMV aralığına sahip olan Durum 5'teki saatlik PMV değerlerinin çok

salınım yaptığı ve de buna bağlı olarak ısı konfor seviyelerinin çok düştüğü görülmektedir. Doğal havalandırmaya sahip olan Durum 5, normal beklenti seviyesi % 68,9 oranında karşılanırken, en yüksek konfor seviyesini ise ancak % 20,7 oranında karşılamaktadır.

Kesikli ve sürekli rejimin ısı konfora etkisi Durum 1 ve Durum 3 ile ele alınmıştır. Durum 1'de ısıtma/soğutma sistemleri kesikli rejimde çalışmalarına rağmen ısı konfor memnuniyet seviyeleri, sürekli rejime göre daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 6. Saatlik PMV değerleri ve PMV dağılım frekansları ve kümülatif frekansları (Hourly PMV values and PMV distribution frequencies and cumulative frequencies) (KF: Kümülatif Frekans)

4.3. Birim Enerji Tüketimi (Unit Energy Consumption)

Durum 1, 2 ve 3 için PMV=0 yapan tek sıcaklık set değerleri, Durum 4 ve 5 için de belirlenen çift sıcaklık set değerleri kullanılarak çalıştırılan

simülasyonlarda aylık ısıtma/soğutma enerji tüketimleri birim alan için belirlenmiştir ve Tablo 5'te verilmiştir.

Aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerleri simülasyonlarında, sürekli rejim (Durum 3) yıllık toplam birim enerji tüketim değerlerinin, kesikli rejim (Durum 1)'e göre ısıtmada % 5,52, soğutmada ise % 10,22 oranında arttığı

görülmektedir. Soğutma enerji tüketimi artışı ısıtmaya göre daha yüksek olmaktadır.

Sürekli rejimde ölü bantlı çift sıcaklık (Durum 4) set değeri uygulaması, tek sıcaklık (Durum 3) uygulamasına göre ısıtma enerji tüketimini % 0,8 soğutma enerji tüketimini ise % 0,63 azaltmaktadır.

Konutta tüketilen doğalgaz yıllık enerji tüketimi 1,15, elektrik yıllık enerji tüketimi 2,8 birincil enerji dönüşüm faktörü ile çarpılarak yıllık ısıtma/soğutma birincil enerji tüketimi hesaplanır [52]. Tüm durumlar için hesaplamalar Tablo 6'da listelenmiştir. Tablo 6'dan görüldüğü üzere, yıllık birincil birim enerji tüketimi (YBBET) 199,36-223,58 kWh/m² arasında bulunmuştur. Fakat her bir durumun ısıl konforu karşılama yüzdeleri veya diğer bir deyişle ısıl konfor seviyeleri kümülatif frekans yüzdeleri (IKSKFY) farklıdır. Bu nedenle ele alınan durumları enerji tüketimleri açısından daha mantıklı bir şekilde karşılaştırmak için durumların YBBET değerinin, IKSKFY değerine bölünmesi ile birim memnuniyet enerji tüketimi (BMET) değeri hesaplanmış ve Tablo 7'de sunulmuştur. Isıl konfor için normal beklenti seviyesinde Durum 2'nin en düşük BMET değerine (2,04 kWh/m²/%KF) sahip olduğu, doğal

havalandırmalı olan Durum 5'in ise en yüksek BMET değerine (2,90 kWh/m²/%KF) sahip olduğu görülmektedir. Diğer yandan kesikli rejime sahip Durum 1'in 2,13 kWh/m²/%KF BMET değeri ile, sürekli rejimin (Durum 3) 2,27 kWh/m²/%KF BMET değerine göre daha az enerji tükettiği gözlenmektedir.

Tablo 6. Yıllık birincil birim enerji tüketimi (kWh/m²) (Annual primary unit energy consumption (kWh/m²))

	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5
Isıtma	182,69	178,08	192,78	191,23	167,08
Soğutma	27,94	21,28	30,81	30,59	32,94
Toplam	210,64	199,36	223,58	221,83	200,03

Tablo 7. Birim memnuniyet enerji tüketimi (kWh/m²/%KF) (Unit satisfaction energy consumption (kWh/m²/%KF))

	-0,2<PMV<+0,2	-0,5<PMV<+0,5
Durum 1	2,24	2,13
Durum 2	2,44	2,04
Durum 3	2,49	2,27
Durum 4	2,31	2,23
Durum 5	9,66	2,90

KF: Kümülatif frekans

Tablo 5. Birim Enerji Tüketimi (kWh/m²) (Unit energy consumption (kWh/m²))

	Durum 1		Durum 2		Durum 3		Durum 4		Durum 5	
	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
Aylar										
Ocak	28,93	0	28,68	0	30,75	0	29,71	0	25,06	0
Şubat	26,09	0	26,14	0	27,45	0	26,64	0	22,56	0
Mart	21,02	0	20,89	0	21,74	0	21,24	0	18,37	0
Nisan	13,68	0	12,78	0	14,13	0	13,77	0	13,19	0
Mayıs	3,77	1,11	3,21	0,70	5,31	1,37	3,88	1,21	4,93	0
Haziran	0	2,33	0	1,84	0	1,97	0	2,53	0	3,68
Temmuz	0	2,75	0	2,68	0	2,92	0	3,00	0	4,07
Ağustos	0	2,38	0	2,39	0	2,78	0	2,60	0	4,01
Eylül	2,18	1,41	0,86	0	3,22	1,95	2,42	1,59	2,45	0
Ekim	12,10	0	11,23	0	11,06	0	12,24	0	11,56	0
Kasım	22,21	0	22,60	0	24,54	0	22,54	0	20,87	0
Aralık	28,89	0	28,48	0	29,44	0	33,84	0	26,30	0
TOPLAM	158,87	9,98	154,86	7,60	167,63	11,00	166,29	10,93	145,29	11,77

I: Isıtma, S: Soğutma

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada İzmir ilindeki bir konut için ısıtma/soğutma sistemlerinin çalışma şartlarının, ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimlerine etkisi analiz edilmiştir. ISO 13790 [53]'a göre dinamik simülasyon yöntemlerinden olan EnergyPlus ve arayüz olarak Design Builder kullanılarak birim

ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir:

Çalışma sonuçları aşağıdaki gibi yorumlanabilir:

- PMV=0 için aylık set sıcaklıkları, tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek

ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerleri Durum 1 için 24,5-26,0°C (operatif), tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değerleri Durum 2 için 24,5-26,2°C (hava) ve tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerleri Durum 3 için 24,2-26,8°C (operatif), arasında değişmektedir. Her ne kadar sıcaklık aralıkları aynı görünse de, hava set sıcaklık değerinin kullanılması ile operatif sıcaklık değerlerine göre set sıcaklık değerlerinde mevsimsel farklılıklar oluşmaktadır. Yani ısıtma dönemlerinde set sıcaklıkları artarken, soğutma dönemleri için sıcaklıkların düştüğü gözlenmektedir. Diğer bir deyişle, verilen sıcaklık aralıklarındaki minimum değerler operatif set sıcaklıkları için ısıtma dönemine denk gelirken, hava sıcaklık set değerleri için soğutma dönemine denk gelmektedir.

- İncelenen durumlar arasında tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerine sahip olan Durum 4, 1,33 PMV aralığı ile en düşük, doğal havalandırmalı, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerleri Durum 5 ise 3,32 PMV aralığı ile en yüksek PMV aralığına sahiptir.
- PMV aralığı azaldıkça, standard sapma da azalmakta ve memnuniyet seviyesi de artmaktadır.
- İncelenen durumların yıllık birincil birim enerji tüketimi (YBBET) 199,36-223,58 kWh/m² arasında değişmektedir.
- Durum 4'te 221,83 kWh/m² yıllık birincil birim enerji tüketimi ile beklenti seviyesi % 99,6 oranında karşılanırken, en yüksek konfor seviyesinin ise ancak % 96 oranında karşılanmaktadır.
- Durum 5, 200,03 kWh/m² yıllık birincil birim enerji tüketimi ile normal beklenti seviyesi % 68,9 oranında karşılanırken, en yüksek konfor seviyesinin ise ancak % 20,7 oranında karşılanmaktadır.
- Sürekli rejimde HVAC sistemi tüm gün boyunca çalıştırılmaktadır. Bu durumda operatif sıcaklık set değerleri hemen hemen aynı olmakla birlikte kesikli rejime göre enerji tüketimi artmaktadır. Birincil enerji tüketimleri karşılaştırıldığında ısıtmada % 10,1 artış ve soğutma enerjisi tüketimindeki % 6,6 düşüş olmaktadır.
- PMV=0'ı sağlayan kesikli rejimde tek operatif (Durum 1) ve hava sıcaklıkları set

değerleri (Durum 2) için elde edilen yıllık birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri karşılaştırıldığında, operatif sıcaklık set değerlerinde hava sıcaklığına göre ısıtma enerjisi tüketimi % 2,5, soğutma enerjisi tüketimi ise % 23,8 daha yüksek olarak belirlenmiştir. Soğutma enerjisi tüketimindeki artışın ısıtma enerjisi tüketimine göre çok yüksek olması, radyasyon sıcaklığının etkisini ortaya koymaktadır.

- Sürekli rejimde ölü bantlı çift sıcaklık set değeri (Durum 4) uygulamasında, tek operatif set değeri (Durum 3) uygulamasına göre hem ısıtma hem de soğutma enerji tüketiminde çok önemli bir değişim görülmemekle birlikte, ısı konfor seviyeleri açısından Durum 4 daha iyidir.
- Isıl konfor seviyesinin % 1'lik kümülatif frekans değerinin sağlanabilmesi için harcanması gereken yıllık birincil birim enerji tüketimini ifade eden birim memnuniyet enerjisi tüketimi, ısı konfor için normal beklenti seviyesinde Durum 2'de en düşük değere sahip olurken, doğal havalandırmalı olan Durum 5'in ise en yüksek birim memnuniyet enerjisi tüketimine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuç gerekli ısı konfor seviyesinin sağlanabilmesi için Durum 5'te daha fazla enerji harcanması gerektiği sonucunu ortaya koymaktadır.
- İncelenen tüm durumlar arasında normal beklenti seviyesinde ısı konforu en çok sağlayan Durum 4 iken, ısı konfor seviyesinin % 1'lik kümülatif frekans değerinin sağlanması için en az enerji tüketen ise Durum 2 olarak belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Projeyi maddi olarak destekleyen Türk Tesisat Mühendisleri Derneği (TTMD)'ne ve çok sayıdaki simülasyon verilerini derleyebilmemiz için yardımcı programlar yazan Orhan Özcan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] DIRECTIVE 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council on the Energy Performance of Buildings, 2002.
- [2] Ergonomics of the Thermal Environment - Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Using

- Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria, EN ISO 7730, 2005.
- [3] Ventilation for Buildings - Design Criteria for the Indoor Environment, CR 1752, 1998.
- [4] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ANSI/ASHRAE, Standard 55-2013, Atlanta, GA, USA, 2013.
- [5] Kalorifer Tesisatı Projelendirme Kuralları, TS 2164, 1988.
- [6] S. P. Corgnati, E. Fabrizio ve M. Filippi, "The impact of indoor thermal conditions, system controls and building types on the building energy demand," *Energy and Buildings*, cilt 40, pp. 627-636, 2008.
- [7] K. Yang ve C. Su, "An approach to building energy savings using the PMV index," *Building and Environment*, cilt 32, no. 1, pp. 25-30, 1997.
- [8] T. H. Karyono, "Report on thermal comfort and building energy studies in Jakarta - Indonesia," *Building and Environment*, cilt 35, no. 1, pp. 77-90, 2000.
- [9] W. Hanqing, H. Chunhua, L. Zhiqiang, T. Guangfa, L. Yingyun ve W. Zhiyong, "Dynamic evaluation of thermal comfort environment of airconditioned buildings," *Building and Environment*, cilt 41, no. 11, pp. 1522-1529, 2006.
- [10] K. W. Tham ve M. B. Ullah, "Building energy performance and thermal comfort in Singapore," *ASHRAE Transactions*, cilt 99, no. 1, pp. 308-321, 1993.
- [11] R. Holz, A. Hourigan, R. Sloop, P. Monkman ve M. Krarti, "Effects of standard energy conserving measures on thermal comfort," *Building and Environment*, cilt 32, no. 1, pp. 31-43, 1997.
- [12] J. F. Karlsson ve B. Moshfegh, "Energy demand and indoor climate in a low energy building-changed control strategies and boundary conditions," *Energy and Buildings*, cilt 38, pp. 315-326, 2005.
- [13] R. Becker, I. Goldberger ve M. Paciuk, "Improving energy performance of school buildings while ensuring indoor air quality ventilation," *Building and Environment*, cilt 42, pp. 3261-3276, 2007.
- [14] H. Jamil, J. Sanjayan, J. Wilson ve M. Alam, "Investigation of PCM as retrofitting option to enhance occupant thermal comfort in a modern residential building," *Energy and Buildings*, cilt 133, p. 217-229, 2016.
- [15] N. Delgarm, S. Delgarm ve B. Sajadia, "Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony(ABC)," *Energy and Buildings*, cilt 131, p. 42-53, 2016.
- [16] Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, prEN 15251, 2007.
- [17] P. O. Fanger, *Thermal Comfort Analyses and Applications in Environmental Engineering*, London: McGraw-Hill, 1970.
- [18] K. Van der Linden, A. C. Boerstra, A. K. Raube ve S. R. Kurvers, "Thermal indoor climate building performance characterized by human comfort response," *Energy and Buildings*, cilt 34, pp. 737-744, 2002.
- [19] J. Huh ve M. J. Brandemuehl, "Optimization of air-conditioning system operating strategies for hot and humid climates," *Energy and Buildings*, cilt 40, pp. 1202-1213, 2008.
- [20] B. Olesen, "The philosophy behind EN 15351: Indoor environmental criteria for design and calculation of energy performance of buildings," *Energy and Buildings*, cilt 39, pp. 740-749, 2007.
- [21] F. Butera, "Principles of thermal comfort," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, cilt 2, p. 39-66, 1998.
- [22] M. S. Jang, C. D. Koh ve I. S. Moon, "Review of thermal comfort design based on PMV/PPD in cabins of Korean maritime patrol vessels," *Building and Environment*, cilt 42, p. 55-61, 2007.
- [23] K. H. Yang ve C. H. Su, "An approach to building energy savings using the PMV index," *Building and Environment*, cilt 32, no. 1, pp. 25-30, 1997.
- [24] F. Sehar, M. Pipattanasomporn ve S. Rahman, "Integrated automation for optimal demand management in commercial buildings considering occupant comfort," *Sustainable Cities and Society*, cilt 28, p. 16-29, 2017.

- [25] R. J. De Dear ve G. S. Brager, "Developing an adaptive model of thermal comfort and preference," *ASHRAE Transactions*, cilt 104, no. 1A, pp. 145-167, 1998.
- [26] L. Peeters, R. De Dear, J. Hensen ve W. D'haeseleer, "Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation," *Applied Energy*, cilt 86, no. 5, pp. 772-780, 2009.
- [27] A. C. Van der Linden, A. C. Boerstra, A. K. Raue, S. R. Kurvers ve R. J. De Dear, "Adaptive temperature limits: A new guideline in The Netherlands. A new approach for the assessment of building performance with respect to thermal indoor climate," *Energy and Buildings*, cilt 38, pp. 8-17, 2006.
- [28] G. S. Brager ve R. J. De Dear, "Thermal adaptation in the built environment: a literature review," *Energy and Building*, cilt 17, pp. 83-96, 1998.
- [29] R. A. Memon, S. Chirarattananon ve P. Vangtook, "Thermal comfort assessment and application of radiant cooling: A case study," *Building and Environment*, cilt 43, pp. 1185-1196, 2008.
- [30] S. Kumar, J. Mathur, S. Mathur, M. K. Singh ve V. Loftness, "An adaptive approach to define thermal comfort zones on psychrometric chart for naturally ventilated buildings in composite climate of India," *Building and Environment*, cilt 109, pp. 135-153, 2016.
- [31] O. Fanger ve J. Toftum, "Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates," *Energy and Buildings*, cilt 34, pp. 533-536, 2002.
- [32] S. A. Damiati, S. A. Zaki ve H. B. Rija, "Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid Season," *Building and Environment*, cilt 109, pp. 208-22, 2016.
- [33] F. Ş. Sezer, "Sağlık Ocaklarında Konfor Koşullarının Değerlendirilmesi: Bursa/Nilüfer Örneği," *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 28, no. 1, pp. 197-208, 2015.
- [34] E. Z. E. Conceicao ve M. Lucio, "Thermal study of school buildings in winter conditions," *Building and Environment*, cilt 43, pp. 782-792, 2008.
- [35] A. Al-Mumin, O. Khattab ve G. Sridhar, "Occupants' behavior and activity patterns influencing the energy consumption in the Kuwaiti residences," *Energy and Buildings*, cilt 35, pp. 549-559, 2003.
- [36] M. Soleimani-Mohseni, B. Thomas ve P. Fahlen, "Estimation of operative temperature in buildings using artificial neural networks," *Energy and Buildings*, cilt 38, pp. 635-640, 2006.
- [37] Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, TS 825, 2008.
- [38] N. Eskin ve H. Turkmen, "Analysis of annual heating and cooling energy requirements for office buildings in different climates in Turkey," *Energy and Buildings*, cilt 40, p. 763-773, 2008.
- [39] M. N. Inanici ve F. N. Demirbilek, "Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey," *Building and Environment*, cilt 35, pp. 41-52, 2000.
- [40] A. Uçar ve F. Balo, "Effect of fuel type on the optimum thickness of selected insulation materials for the four different climatic regions of Turkey," *Applied Energy*, cilt 86, pp. 730-736, 2009.
- [41] K. O. Oral ve Z. Yılmaz, "Building form for cold climatic zones related to building envelope from heating energy conservation point of view," *Energy and Buildings*, cilt 35, p. 383-388, 2003.
- [42] M. Yaman, Energy efficiency in a university building: Energy performance assessment of IZTECH Administrative Building, İzmir: MSc. Thesis, İzmir Institute of Technology, 2009.
- [43] C. Coşkun ve Z. Oktay, "Energy audit of a University Building in energy saving perspective," *Seminar of Energy Performance of Buildings, Proceedings of TESKON 2009*, İzmir, 2009.
- [44] N. Arslanoğlu ve Y. Abdulvahap, "The Effect Of Different Indoor Air Velocities and Temperatures On Thermal Comfort," *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, cilt 31, no. 2, pp. 95 -100, 2011.
- [45] Design Builder Software., [Çevrimiçi]. <http://www.designbuilder.co.uk>. Erişim Tarihi: 22.01.2016.
- [46] Binaların Isıl Performansı-Meskenlerde Isıtma Amacıyla Kullanılan Enerjinin Hesaplanması, TS EN 832, 2007.

- [47] D. B. Crawley, L. Lawrie ve C. Pedersen, “EnergyPlus: creating a new generation building energy simulation program,” *Energy and Buildings*, cilt 33, no. 4, pp. 319-331, 2001.
- [48] EnergyPlus Engineering Reference. “The Reference to EnergyPlus Calculations,” [Çevrimiçi]. <https://energyplus.net/sites/default/files/pdfs/v8.3.0/EngineeringReference.pdf>. Erişim Tarihi: 22.01.2016.
- [49] ASHRAE, Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations,» *ASHRAE Handbook Fundamentals*, Atlanta, ASHRAE, Chapter 30, 2005.
- [50] S. J. Rees , M. G. Davies, J. D. Spitler ve P. Haves, “Qualitative comparison of North American and U.K. cooling load calculation methods,” *HVAC&Research*, cilt 6, pp. 75-99, 2000.
- [51] Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs, ANSI/ASHRAE 140, 2007.
- [52] The Government's Standard Assessment Procedure for Energy Rating of Dwellings, 2005 Ed., Revision 1, Version 9.81, SAP2005, 2008.
- [53] Energy Performance of buildings - Calculation of Energy Use for Space Heating and Cooling, ISO 13790, 2008.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> <u>Kabul/Accepted</u>	<u>Doi</u>	

Isıl konfor sıcaklıklarına bağı olarak bir konutun enerji performansının değerlendirmesi: İzmir örneği

Nurdan Yıldırım^{*1}, Ebru Kuzgunkaya², Gülden Gökçen Akkurt³

ÖZ

Türkiye’de enerji tüketiminin yaklaşık %34’ü binalarda ve bunun %85 kadarı da ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılmaktadır. Binalarda bulunan HVAC sistemlerinin işletme özellikleri, hem binanın ısıl konforunu hem de enerji tüketimlerini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, HVAC sistemlerinin işletme şartlarının, ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimlerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla İzmir ilindeki 100 m²’lik bir konut için öngörülen HVAC sisteminin kesikli ve sürekli rejimde, tek ve çift sıcaklık set değerleri ile tam mekanik kontrollü veya doğal havalandırılmalı olarak çalıştırılması durumları incelenmiştir.

Isıl konfordan olan memnuniyet; Tahmini Ortalama Oy (Predicted Mean Vote - PMV) değeri ile ifade edilmektedir. Bu kapsamda öncelikle, Design Builder yazılımı kullanılarak en iyi duruma karşılık gelen PMV=0’a göre HVAC sisteminin set sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu sıcaklık set değerlerinin kullanılması ile ele alınan 5 farklı durumda konut için yıllık birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen 5 durum arasında normal beklenti seviyesinde % 99,6 kümülatif frekans yüzdesi ile ısıl konforu en çok sağlayan tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerli durumdur. Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değerli durum ise 2,04 kWh/m²/%KF birim memnuniyet enerji tüketimi değeri ile en az enerji tüketen durum olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: ısıl konfor, enerji tüketimi, PMV, Fanger ve adaptif metod

* Corresponding Author

¹ Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, nurdan.yildirim@yasar.edu.tr

² İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi, ebru.kuzgunkaya@iyte.edu.tr

³ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, guldengokcen@iyte.edu.tr

Energy performance assessment of a residential house based on thermal comfort temperatures: Izmir sample

ABSTRACT

34% of the energy consumption in Turkey belongs to buildings and around 85% of this consumption is utilized for heating purposes. The operating characteristics of the HVAC systems in buildings directly affect both the building's thermal comfort and energy consumption. This study aims to determine the effect of operating conditions of the HVAC system on thermal comfort and energy consumption of residential buildings. For this purpose, the HVAC system for a 100 sqm residence in İzmir city has been investigated according to the single and double temperature set values at continues and intermittent operating modes for fully mechanically control or natural ventilation conditions.

Thermal comfort satisfaction is expressed by PMV value. In this context, primarily the set temperatures of the HVAC system are determined for $PMV = 0$ which represents the best case of thermal comfort by using Design Builder software. Annual specific heating/cooling energy consumption, annual primer specific energy consumption, hourly PMV values during occupancy hours and statistical evaluation of these PMV values of a residential house are realized for considered 5 different operating conditions of HVAC system by using determined temperature set values. According to the obtained results, among 5 cases, the case with fully mechanical controlled, continuous regime, monthly dual heating/cooling operative set values, provides the maximum thermal comfort for normal expectation level of the thermal comfort with a cumulative frequency of 99.6%. The case, with fully mechanical controlled, intermittent regime, monthly single heating/cooling operative set values, consumes the minimum energy with specific satisfaction energy consumption of $2.04 \text{ kWh/m}^2/\%KF$.

Keywords: thermal comfort, energy consumption, PMV, Fanger and adaptive method

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Avrupa Birliği'nde binalarda enerji tüketiminin azaltılması amacıyla yayınlanan DIRECTIVE 2002/92/EC [1], her üye ülkenin binaların enerji performansının hesaplanması için bir metot geliştirmesini öngörmekte ve bu metotta enerji ihtiyaçlarının belirlenmesinde iç ısı konfor koşullarının gözetilmesini şart koşmaktadır. Binalarda ısı konfor ve iç hava kalitesinin belirlenmesine yönelik olarak kullanılan standartlar EN ISO 7730 [2], CR 1752 [3], ASHRAE 55-2013 [4] ve TS 2164 [5]'dir.

Binaların ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı/tüketimi, ısı konfor ihtiyacına bağlı olarak değişir ve bu nedenle ısı konfor seviyesinin net bir şekilde tanımlanması önemlidir. Binalarda enerji performansı ile konfor seviyesinin ilişkilendirilmesi üzerine yapılmış pek çok çalışma mevcuttur [6-15]. Isı konfor seviyesinin sınıflandırılması ve sertifikasyonu prEN 15251 [16] standardı tarafından yapılmaktadır. Bu standart, HVAC sistem tasarımında kullanılacak

ısı konfor parametrelerinin belirlenmesinin yanısıra ölçüm ve hesaplamalardan kaynaklanan uzun vadeli ısı konfor değerlendirme metodlarını da tanımlar. Isı konfor seviyesi 4 kategoride sınıflandırılır: I. kategori, ısı konfor açısından en yüksek beklenti seviyesini, dolayısı ile en yüksek memnuniyet seviyesini ($-0,2 < PMV < +0,2$) gösterir. Engelli, hasta kişiler, yaşlılar ve çocukların bulunduğu hacimler için tavsiye edilir. II. kategori, yeni ve tadilat görmüş binalar için kullanılır ve normal beklenti seviyesine karşılık gelir. Bu kategori için $-0,5 < PMV < +0,5$ aralığı önerilir ki standartlarda ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ısı konfor aralığıdır [2, 6, 13, 17-19] ve Beklenen Memnuniyetsizlik Yüzdesi (Predicted Percentage Dissatisfied - PPD) göstergesi % 10'un altındadır. Havalandırma Binalar için - Bina İç Ortamlar İçin Tasarım Kuralları standardı olan CR 1752 [3]'ye göre bu aralık Kategori B olarak tanımlanır.

Konfor koşulları; hava sıcaklığı, bağıl nemi ve hızının yanı sıra hacmi çevreleyen yüzeyler ile hacim içinde yer alan objelerin yüzey sıcaklıkları (ortalama radyasyon sıcaklığı) ile doğrudan

ilişkilidir. Hava sıcaklığı ile ortalama radyasyon sıcaklığının kombinasyonundan oluşan operatif sıcaklık, ısı konforunun tanımlanması için önemli bir sıcaklıktır [2], [4], [17]. İnsan vücudu operatif sıcaklığa karşı daha hassastır ve bu nedenle ASHRAE 55 [4] ve EN ISO 7730 [2]'de ısı konfor sıcaklığı olarak "operatif sıcaklık" değerleri verilmiştir. Her bir kategori için, değişen PMV aralıklarına karşılık gelen ve hacimde yaşayanların hareket düzeyi ve giyim şekline bağlı ve ısı konforunun tanımlanması için önemli bir sıcaklık olan operatif sıcaklıklar belirlenebilir [20-21].

Isıl konfor ve bunun enerji tüketimi ile ilişkisi, ısı konforu sağlayan HVAC sistem stratejilerine (mekanik, doğal, hibrit) bağlı olarak analiz edilir. Bu stratejiler kullanıcı beklentileri ve davranışlarına bağlıdır. Fanger ısı konfor modeli, kullanıcı müdahalesine izin vermeyen kontrollü bir HVAC sisteminin mevcut olduğu, tamamen kapalı (doğal havalandırmanın mümkün olmadığı) bir iklim çemberinde bulunan kişiler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile geliştirilmiştir. Bu nedenle merkezi HVAC sistemi bulunan binaların ısı konfor değerlendirmeleri PMV indeksine dayanan Fanger modeli [4, 17, 22-24] ile belirlenir. Öte yandan saha çalışmaları pencerelerin açılabilirdiği (doğal havalandırmanın olduğu), kullanıcı müdahalesine izin veren HVAC sistemlerinin kullanıldığı binalarda, kişilerin ısı konforunun, Fanger modelinden farklı şekilde değerlendirildiği görülmüştür. Bütünüyle mekanik olarak kontrol edilmeyen binalarda, kullanıcıların ısı konfor sıcaklığı aralığı beklentileri Fanger teorisi ile elde edilen aralığa göre daha geniştir ve kullanıcılar kendilerini psikolojik, fizyolojik ve davranışsal olarak dış ortam koşullarına adapte ederler. Bu nedenle doğal havalandırmanın olduğu binalarda "dinamik" adaptif konfor yaklaşımı kullanımı [18, 25-30] ya da genişletilmiş PMV modeli [31] önerilmektedir. Adaptif konfor yaklaşımının kullanımında "kişisel kontrol" önemlidir [32]. Kişiler giyim durumlarını ya da pencere açarak ortamın hava hızını artırarak ısı konfor koşulları kontrol edebilirler [33]. Özellikle yaz aylarında pencerelerin açılması dolayısıyla gerçekleşen doğal havalandırma ile PMV modeli ile belirlenen sıcaklıklardan daha yüksek iç hava sıcaklıklarında kişiler konforlu hissedebilmektedir. Bu da enerji tüketiminin azalması anlamına gelir [27].

İnsan vücudu operatif sıcaklığa daha hassas olmasına rağmen, operatif sıcaklığı ölçen termometrelerin pahalı ve büyük boyutlu olması,

operatif sıcaklığın hacmin farklı noktalarında farklı olması gibi nedenlerden kaynaklanan ölçüm problemleri HVAC sistem kontrollerinin hava sıcaklığına göre yapılmasına neden olmaktadır [12, 34-35]. Operatif sıcaklığın ölçülmesindeki zorluklar, ölçümü kolay olan (dış hava sıcaklığı, enerji tüketimi, zaman vb.) parametreler kullanılarak tahmin edilmesi yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu yöntemlerden biri de incelenen hacmin ya da binanın yapay sınır ağları ile modellenmesidir. Yapılan çalışmalarda ölçüm değerleri ile karşılaştırıldığında operatif sıcaklık tahminlerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür [36].

Türkiye'de binalarda enerji performansı çalışmaları, TS 825 [37]'nin zorunlu hale gelmesi ile 2000'li yıllarda başlamış olup ısıtma ve soğutma sezonlarında iç ortam set sıcaklığının sabit tutularak binaların enerji ihtiyacı/tüketimleri ile bu ihtiyaç/tüketimleri azaltacak önlemlerin simüle edilmesini içermektedir [38-41].

İstanbul'da bir ofis binasının ısıtma/soğutma enerji ihtiyacı EnergyPlus yazılımı ile simüle edilmiş ve bina yönetim sisteminden alınan ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı ofis binasının Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesinden seçilen İstanbul, Ankara, İzmir ve Antalya illerinde bulunması durumlarında alınabilecek enerji tasarrufu önlemleri yine EnergyPlus yardımı ile belirlenmiştir. Ofislerde iç hava sıcaklıkları ısıtma ve soğutma sezonları için set edilmiş ve bu sıcaklıklarda dış hava sıcaklıkları, yalıtım, bina görüş faktörü, dış yüzeylerin rengi, gölgeleme, ventilasyon hızı ve farklı dış hava kontrol stratejilerinin ısıtma/soğutma ihtiyacına olan etkileri belirlenmiştir [38].

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne ait bir binada ısıtma ve soğutma sezonlarında iç hava sıcaklığı sabit tutularak binanın enerji tüketimleri Ecotect ve EnergyPlus yazılımları ile belirlenmiş, ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve tüketimlerin azaltılması yönünde alınabilecek önlemler simüle edilmiştir [42]. Balıkesir Üniversitesi'nde yapılan çalışmada, üniversiteye ait bir binada enerji tüketim verileri toplanmış, tüketim değerlerinin binaya yalıtım uygulanması, kazan veriminin artırılması ve doğal aydınlatma ile gerçekleşecek enerji tasarrufu ile azaltılması ve buna bağlı olarak gerçekleşecek sera gazı emisyonlarındaki düşüş belirlenmiştir [43]. Bir diğer çalışma ise Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Isı Tekniği Laboratuvarında bulunan iklimlendirme

odasında deneyler gerçekleştirilmiş ve ısıl konforun tespiti için PMV indisi kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucu ortaya çıkan grafikleri ve PMV değerlerini birlikte değerlendirerek konfordan fedakarlık etmeden tasarruf gerçekleştirebilecek iklimlendirme sistemlerinin optimum çalışma şartları belirlenmeye çalışılmıştır [44].

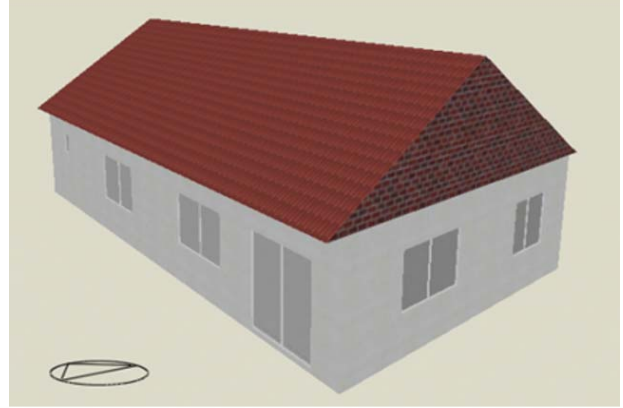
Bu çalışmanın amacı İzmir ili için ısıl konfor seviyesi ve birim enerji tüketimine göre uygun çalışma rejimlerinin saptanmasıdır. Bu çalışmada İzmir ilinde 4 kişilik bir ailenin yaşadığı, 100 m² kullanım alanına sahip müstakil bir konutun, 5 farklı HVAC sistemi çalışma şartları gözönünde bulundurularak konut içerisinde yıl boyunca gerçekleşen ısıl konfor koşulları ve enerji tüketimleri belirlenmiş ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

2. KONUTUN TANITIMI (DESCRIPTION OF THE CASE BUILDING)

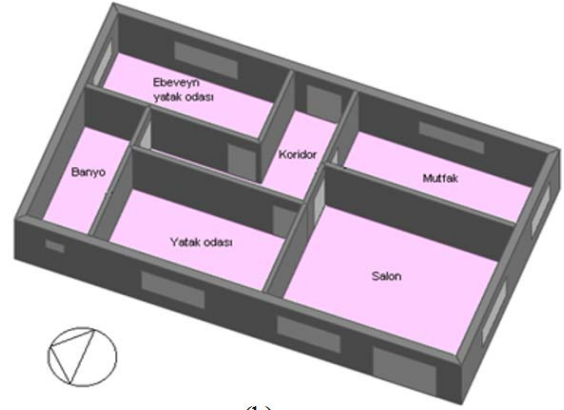
Isıl konfor koşullarının ısıtma ve soğutma enerji tüketimlerine olan etkisinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan tek katlı örnek konutun panoramik görünümü Şekil 1 (a)'da, yerleşim planı ise Şekil 1 (b)'de verilmiştir.

Ayrık nizamda tasarlanan ve 100 m² oturma alanına sahip konutun ve bileşenlerinin (hacim, duvar, pencere, kapı) alanları ve TS 825'e göre minimum koşulları sağlaması için yapı elemanlarının sahip olması gereken toplam ısı

geçiş katsayıları (U) Tablo 1'de verilmiştir. Pencere/duvar oranı 0,187 olarak belirlenmiştir. Pencere/duvar oranı; 4 cm kalınlığında PVC çerçeve, 3 mm cam + 13 mm hava boşluklu çift cam kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 1. Konutun (a) panoramik görünümü ve (b) yerleşim planı ((a) panoramic view and (b) layout of the building)

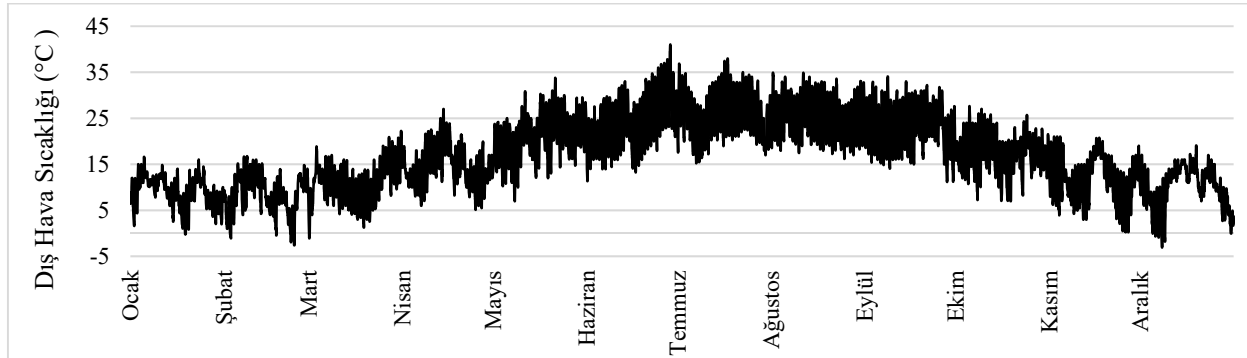
Tablo 1. Konutun bileşenlerinin alanları ve yapı elemanlarının ısı iletim katsayıları (The areas of the components of the house and the heat transfer coefficients of the building elements)

Yapı Elemanı	Pencere	Kapı	Dış duvar	Taban	Tavan	
Toplam ısı geçiş katsayısı (U) (W/m ² K)	2,282	2,282	0,581	0,615	0,447	
Mahal	Yön	Yüzey Alanları (m ²)				
Salon	G	2,60	-	10,60	28,85	28,85
	B	2,60	4,20	9,73		
Ebeveyn yatak odası	K	1,89	-	5,43	14,50	14,50
	D	2,60	-	12,39		
Yatak odası	B	2,60	-	12,39	17,99	17,99
	G	1,95	-	5,37	15,99	15,99
Mutfak	D	1,85	-	14,73		
	K	-	-	13,20	9,60	9,60
Banyo	B	0,36	-	5,14		
	D	-	2,31	3,19	13,50	13,50
Koridor						
TOPLAM ALAN						
		17,28	6,51	92,17	100,43	100,43

DesignBuilder [45] yazılımının veri tabanında Energy Plus (epw) formatında İzmir için saatlik meteorolojik veriler mevcuttur (Şekil 2).

İncelenen örnek konutta 4 kişilik bir ailenin yaşadığı ve ailenin konutta bulunduğu saatler

Tablo 2’de verildiği şekilde kabul edilmiştir. Tablo 2’ye göre aile yılın %73’ünü (6411 saat) konutta geçirmektedir. HVAC sisteminin kesikli çalışma durumundaki çalışma saatleri de ailenin konutta bulunduğu saatler göz önüne alınarak belirlenmiş ve Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. İzmir ili için Energy Plus (epw) formatında saatlik dış hava sıcaklığı (Hourly outdoor temperature in Energy Plus (epw) format for Izmir province.)

Tablo 2. Ailenin konutta bulunduğu saatler ve HVAC sistemi çalışma saatleri (kesikli) (Occupancy hours and operating hours of HVAC system).

Ailenin konutta bulunduğu saatler	Hafta içi	Hafta sonu
	18:00-08:00	Tüm gün
Çalışma rejimi	17:00-08:00	Tüm gün
Isıtma	18:00-24:00	11:00-24:00
Soğutma		

- Ailenin konutta bulunma durumuna bağlı olarak değişen metabolik kazançlar, cihaz kullanımı ve aydınlatmadan kaynaklanan iç ısı kazançları TS EN 832 [46]’ye göre konut ortalaması 5 W/m² olacak şekilde belirlenmiştir.

3. YÖNTEM (METHOD)

Çalışmada yapılan başlıca kabuller ve alınan değerler aşağıda listelenmiştir:

- Konuttaki insan yoğunluğu 0,04 kişi/m²’dir.
- Simülasyonlarda, ısıl konforu etkileyen iç mekan iklimsel parametrelerinden olan hava hızı 0,1 m/s’den düşük olarak kabul edilmiş, kişisel parametrelerden olan konut içindeki aktivite seviyesi ise 0,9 met olarak sabit tutulmuştur.
- Çalışmada sıcak su ve aydınlatma enerji tüketimleri dikkate alınmamış, sadece ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri incelenmiştir.
- Konutta ısıtma sistemi olarak doğal gaz yakıtlı kazan ve sıcak sulu radyatör sistemi, soğutma sistemi olarak da klima kullanımı öngörülmüştür.
- Konutun ısıtma/soğutma enerji tüketiminin belirlenmesinde doğal gaz ile klimaların elektrik tüketimi dikkate alınmıştır.
- Isıtma/soğutma sisteminde kullanılan fan, pompa vb. yardımcı ekipmanların tüketimi elektrik tüketimine dahil edilmemiştir.
- Isıtma sistem verimi %85, soğutma sistemi COP değeri 3 olarak alınmıştır.

Konutun ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimi arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için, örnek konutun ısıtma/soğutma sistemi, kesikli ve sürekli çalışma rejimi benimsenerek EnergyPlus yazılımında aylık olarak simüle edilmiştir.

EnergyPlus, 2001 yılında ABD Enerji Bakanlığı [47] tarafından geliştirilmiş modüler bir yazılımdır. İki yılda bir yenilenir ve BLAST ile DOE-2’nin en iyi özelliklerinin birleşiminden oluşur. Yazılım ASHRAE Isıl Denge Metodu’nu kullanır. Isıl Denge Metodu; saatlik-dinamik bir metot olup güneş kazançları ve iç kazançların detaylı hesaplanması, iç yüzey sıcaklıklarının her yüzey için ayrı ayrı tanımlanması, doğal havalandırma, gölgeleme, HVAC ekipmanları ve ısıl kütlelerin dahil edilmesi ile fiziksel duruma en yakın ve kabullerin en aza indirildiği, dolayısı ile de gerçeğe en yakın sonuçları verir [48-50]. EnergyPlus, ANSI/ASHRAE 140 [51] doğrulamasına sahiptir.

Bu çalışmada, HVAC sistemleri Fanger ısıl konfor modeline göre tam mekanik kontrollü ve De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak doğal havalandırılmalı olacak

şekilde 2 ana kategoride ele alınmış olup, sıcaklık set değerlerine göre ise 5 alternatif durum için simülasyonlar yapılmıştır. Eğer ısıtma/soğutma sistemleri tek bir sıcaklığa göre değil, belirli bir sıcaklık aralığına göre çalıştırılıyorsa ölü bantlı çift sıcaklık set değeri olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda çalışmada ele alınan simülasyonlar;

- Durum 1: Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 2: Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değeri
- Durum 3: Tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 4: Tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 5: Doğal havalandırılmalı, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri

Simülasyonlarda, mekanik kontrollü HVAC sistemlerinde öncelikli olarak operatif termostat bir diğer alternatif olarak hava sıcaklığı set değerleri kullanılmıştır.

Durum 4 olarak adlandırılan alternatifte HVAC sistemleri için iki farklı operatif sıcaklık set değerleri (ölü bantlı çift sıcaklık set değeri) belirlenerek HVAC sistemlerinin bu iki sıcaklık değeri arasında simülasyonları yapılmıştır.

Doğal havalandırmaya dolayısı ile kişisel kontrole izin verilen adaptif konfor yaklaşımında De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak alt ve üst operatif sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

3.1. Sıcaklık set değerlerinin belirlenmesi (Determination of Temperature Set Values)

Her bir simülasyon adımında aylık olarak; ASHRAE 55-2013 [4] ve ISO 7730 [2]'da verilen 19,0-26,5°C ısıtma, 23,5-28,0°C soğutma operatif sıcaklık aralıkları için 1°C'lik sıcaklık adımlarında konut simüle edilmiş ve aylık ortalama PMV değerleri belirlenmiştir. Set sıcaklıkları ile aylık ortalama PMV değerlerinin lineer olarak değiştiği gözlenmiştir. Dolayısı ile simüle edilen her bir ay için Set Sıcaklığı-PMV eğrileri oluşturularak -

0,5<PMV<+0,5 konfor aralığında PMV'yi -0,5, 0 ve +0,5 yapan aylık sıcaklık (operatif, hava) set değerleri belirlenmiştir.

Ölü bantlı çift sıcaklık set değerinin belirlenmesi için kesikli rejimde PMV=0 yapan operatif set sıcaklıkları simülasyonda ölü bantlı çift sıcaklık modunda birincil set sıcaklığı olarak kullanılmıştır. İkincil set sıcaklıkları için ısıtmada PMV'yi -0,5, soğutmada ise PMV'yi +0,5 yapan operatif sıcaklık değerleri kullanılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır.

Doğal havalandırma için %90 kabul edilebilir alt ve üst, operatif sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1 ve 2'de olduğu gibi belirlenir [18, 25-29].

$$\text{ÜSL (üst sıcaklık limiti)} = 0,31 * T_0 + 20,3 \quad (1)$$

$$\text{ASL (alt sıcaklık limiti)} = 0,31 * T_0 + 15,3 \quad (2)$$

$T_0 =$ Dış hava sıcaklığı (°C)

3.2. Saatlik PMV Değerlerinin Belirlenmesi ve İstatistiksel Değerlendirme (Determination of Hourly PMV Values and Statistical Evaluation)

Bir yıl için PMV=0 yapan set sıcaklıkları simülasyonlarda giriş verisi olarak kullanılmış ve ailenin konutta bulunduğu saatler için çalıştırılan simülasyonlardan elde edilen saatlik PMV değerleri çıkış verisi olarak elde edilmiştir. Yıl boyunca elde edilen saatlik PMV değerleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Frekans dağılımları ve dağılım özellikleri (ortalama değer, orta değer, standard sapma, varyans, en küçük değer, en büyük değer ve aralık) ile ailenin konutta bulunduğu saatlerin % kaçının -0,2<PMV<+0,2 ve -0,5<PMV<+0,5 konfor aralıklarına düştüğü belirlenmiştir.

4. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

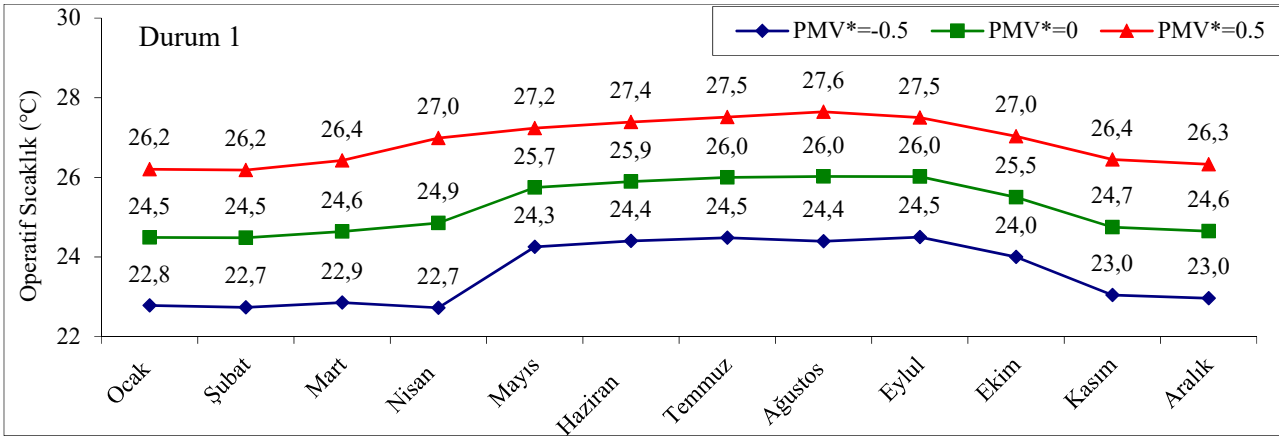
İzmir ilindeki bir konut için ısıtma/soğutma sistemlerinin çalışma şartlarının, ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimlerine etkisi 5 farklı durum analiz edilmiştir. Dinamik simülasyon yöntemlerinden olan EnergyPlus ve arayüz olarak Design Builder kullanılarak yapılan toplam 540 simülasyon ile öncelikle ısıtma/soğutma sistemlerinin sıcaklık set değerleri belirlenerek,

daha sonra elde edilen bu set değerlerinin kullanılması ile her bir durumun birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, yıllık birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

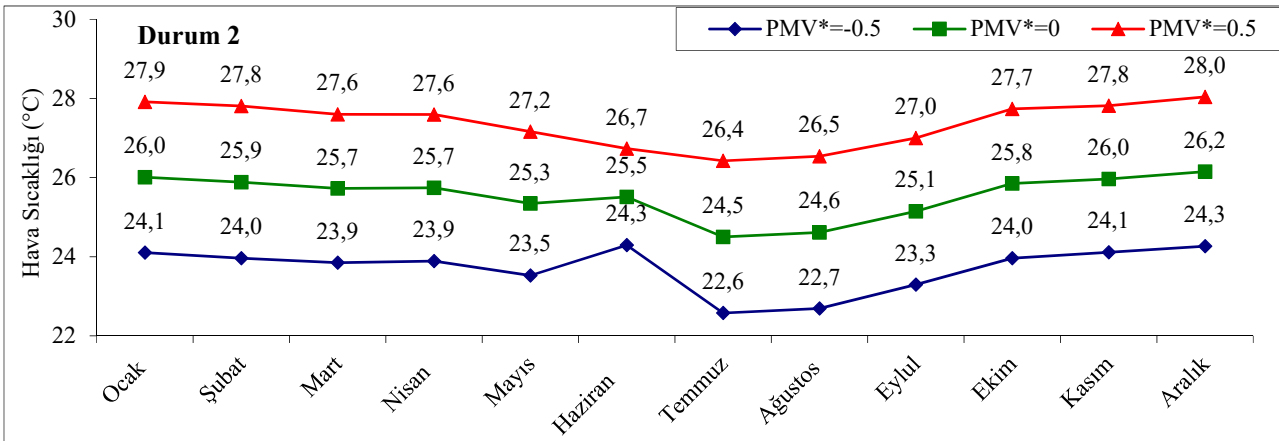
4.1. Sıcaklık Set Değerlerinin Belirlenmesi (Determination of Temperature Set Values)

Durum 1, 2 ve 3 için $PMV=-0,5$, 0 ve $+0,5$ 'i sağlayan ısıtma/soğutma sisteminin aylık tek sıcaklık set değerleri belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'te verilmiştir. Aylık set sıcaklıkları,

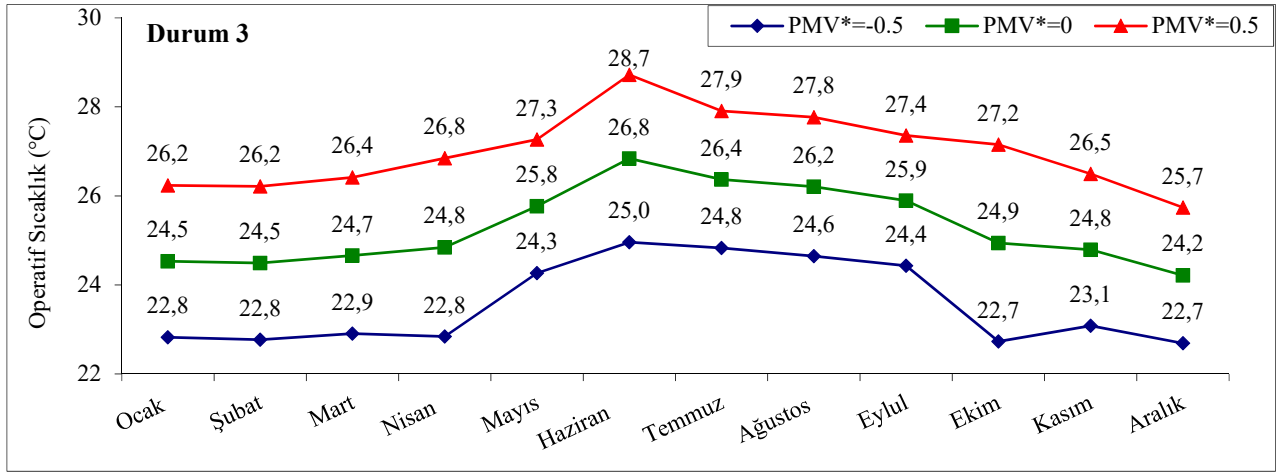
Durum 1 için $24,5-26,0^{\circ}C$ (operatif), Durum 2 için $24,5-26,2^{\circ}C$ (hava) ve Durum 3 için $24,2-26,8^{\circ}C$ (operatif), arasında değişmektedir. Her üç Durum için belirlenen set sıcaklık aralıkları birbirleri ile yaklaşık aynı görünmesine rağmen, Şekil 3, 4 ve 5'ten açıkça görüldüğü üzere Durum 2'de belirlenen set sıcaklıklarının eğilimi, Durum 1 ve Durum 3'e göre farklılık göstermektedir. Bunun nedeni Durum 2'de hava sıcaklık set değerlerinin kullanılmasının olduğu düşünülmektedir. Hava set sıcaklık değerinin kullanılması ile operatif sıcaklık değerlerine göre set sıcaklık değerlerinde mevsimsel farklılıklar oluşmaktadır. Yani ısıtma dönemlerinde set sıcaklıkları artarken, soğutma dönemleri için sıcaklıkların düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 3. Durum 1 operatif sıcaklık set değerleri ($^{\circ}C$) (Case 1 operative temperature set values ($^{\circ}C$))



Şekil 4. Durum 2 hava sıcaklığı set değerleri ($^{\circ}C$) (Case 2 air temperature set values ($^{\circ}C$))



Şekil 5. Durum 3 operatif sıcaklık set değerleri (°C) (Case 3 operative temperature set values (°C))

Durum 4 için, ölü bantlı çift sıcaklık modunda birincil set sıcaklığı olarak kesikli rejimde $PMV=0$ yapan operatif sıcaklıklar, ikincil set sıcaklıkları için ısıtmada PMV 'yi $-0,5$, soğutmada ise PMV 'yi $+0,5$ yapan operatif sıcaklık değerleri kullanılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır. Örnek olarak Şekil 3'de İzmir ili için Eylül ayı ısıtma/soğutma birincil set sıcaklığı $26,0^{\circ}C$, ikincil set sıcaklıkları ısıtma için $24,5^{\circ}C$, soğutma için $27,5^{\circ}C$ alınmıştır. Durum 4 için ölü bantlı çift sıcaklık değerleri, HVAC sistemi ısıtma sezonunda $24,5-26^{\circ}C$, soğutma sezonunda ise $26,0-27,5^{\circ}C$ olarak alınmıştır.

Durum 5 için De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak aylık alt ve üst sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1 ve 2'ye göre hesaplanmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

4.2. PMV Değerleri ve İstatistiksel Değerlendirme (PMV Values and Statistical Evaluation)

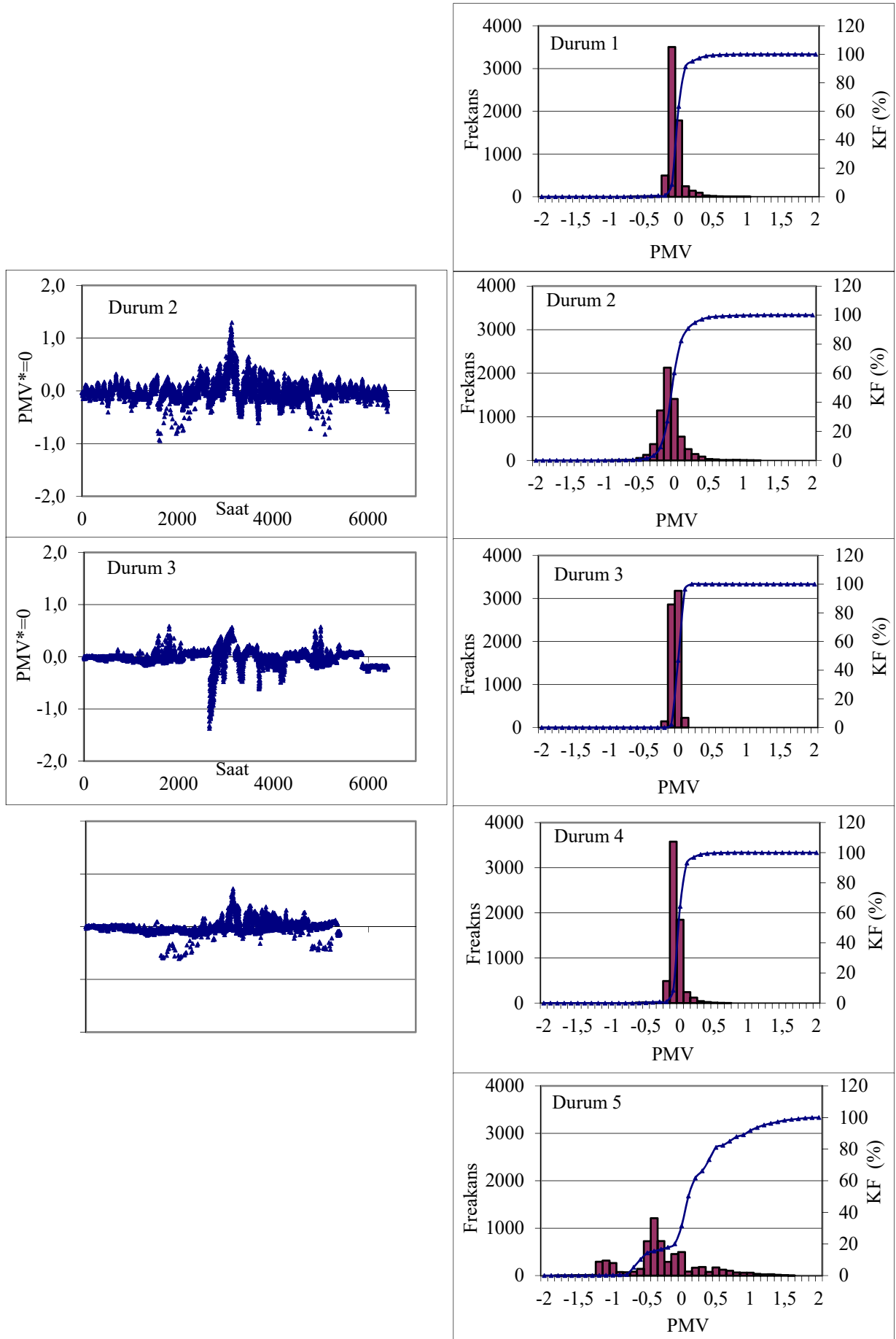
Durum 1, 2 ve 3 için $PMV=0$ yapan tek sıcaklık set değerleri, Durum 4 ve 5 için de belirlenen çift sıcaklık set değerleri kullanılarak çalıştırılan simülasyonlarda ailenin konutta bulunduğu saatler için elde edilen saatlik PMV değerleri (çıkış verisi) Şekil 6'da verilmiştir. Saatlik PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi sonucu PMV dağılım frekansları ve kümülatif frekansları da Şekil 6'da, dağılım özellikleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Durum 5 alt ve üst operatif sıcaklık set değeri (°C) (Case 3 lower and upper operative temperature set values (°C)).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
ASL	18,1	17,9	18,6	19,8	21,8	22,9	23,3	23,2	22,4	20,6	18,8	18,3
ÜSL	23,1	22,9	23,6	24,8	26,8	27,9	28,3	28,2	27,4	25,6	23,8	23,3

Tablo 4. Saatlik PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi (Statistical evaluation of hourly PMV values)

	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5
Ortalama	-0,0087	-0,012	-0,3885	-0,0156	-0,224
Ortakdaki değer	-0,0299	-0,0304	-0,4205	-0,0275	-0,3022
Standard sapma	0,1167	0,1839	0,3514	0,095	0,5327
Varyans	0,0136	0,0338	0,1235	0,0090	0,2838
En küçük değer	-0,6890	-0,9464	-1,1355	-0,6062	-1,7166
En büyük değer	1,0122	1,2973	0,8669	0,7204	1,6062
Aralık	1,70	2,24	2,00	1,33	3,32
$-0,2 < PMV < +0,2$	94,1	81,6	89,8	96,0	20,7
$-0,5 < PMV < +0,5$	98,9	97,9	98,5	99,6	68,9



Şekil 6. Saatlik PMV değerleri ve PMV dağılım frekansları ve kümülatif frekansları (Hourly PMV values and PMV distribution frequencies and cumulative frequencies) (KF: Kümülatif Frekans)

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> <u>Kabul/Accepted</u>	<u>Doi</u>	

Isıl konfor sıcaklıklarına bağı olarak bir konutun enerji performansının değerlendirmesi: İzmir örneği

Nurdan Yıldırım^{*1}, Ebru Kuzgunkaya², Gülden Gökçen Akkurt³

ÖZ

Türkiye’de enerji tüketiminin yaklaşık %34’ü binalarda ve bunun %85 kadarı da ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılmaktadır. Binalarda bulunan HVAC sistemlerinin işletme özellikleri, hem binanın ısıl konforunu hem de enerji tüketimlerini doğrudan etkilemektedir. Bu çalışmada, HVAC sistemlerinin işletme şartlarının, ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimlerine olan etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla İzmir ilindeki 100 m²’lik bir konut için öngörülen HVAC sisteminin kesikli ve sürekli rejimde, tek ve çift sıcaklık set değerleri ile tam mekanik kontrollü veya doğal havalandırılmalı olarak çalıştırılması durumları incelenmiştir.

Isıl konfordan olan memnuniyet; Tahmini Ortalama Oy (Predicted Mean Vote - PMV) değeri ile ifade edilmektedir. Bu kapsamda öncelikle, Design Builder yazılımı kullanılarak en iyi duruma karşılık gelen PMV=0’a göre HVAC sisteminin set sıcaklıkları belirlenmiştir. Bu sıcaklık set değerlerinin kullanılması ile ele alınan 5 farklı durumda konut için yıllık birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, incelenen 5 durum arasında normal beklenti seviyesinde % 99,6 kümülatif frekans yüzdesi ile ısıl konforu en çok sağlayan tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değerli durumdur. Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değerli durum ise 2,04 kWh/m²/%KF birim memnuniyet enerji tüketimi değeri ile en az enerji tüketen durum olmaktadır.

Anahtar Kelimeler: ısıl konfor, enerji tüketimi, PMV, Fanger ve adaptif metod

* Corresponding Author

¹ Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, nurdan.yildirim@yasar.edu.tr

² İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Jeotermal Enerji Araştırma ve Uygulama Merkezi, ebru.kuzgunkaya@iyte.edu.tr

³ İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, guldengokcen@iyte.edu.tr

Energy performance assessment of a residential house based on thermal comfort temperatures: Izmir sample

ABSTRACT

34% of the energy consumption in Turkey belongs to buildings and around 85% of this consumption is utilized for heating purposes. The operating characteristics of the HVAC systems in buildings directly affect both the building's thermal comfort and energy consumption. This study aims to determine the effect of operating conditions of the HVAC system on thermal comfort and energy consumption of residential buildings. For this purpose, the HVAC system for a 100 sqm residence in İzmir city has been investigated according to the single and double temperature set values at continues and intermittent operating modes for fully mechanically control or natural ventilation conditions.

Thermal comfort satisfaction is expressed by PMV value. In this context, primarily the set temperatures of the HVAC system are determined for $PMV = 0$ which represents the best case of thermal comfort by using Design Builder software. Annual specific heating/cooling energy consumption, annual primer specific energy consumption, hourly PMV values during occupancy hours and statistical evaluation of these PMV values of a residential house are realized for considered 5 different operating conditions of HVAC system by using determined temperature set values. According to the obtained results, among 5 cases, the case with fully mechanical controlled, continuous regime, monthly dual heating/cooling operative set values, provides the maximum thermal comfort for normal expectation level of the thermal comfort with a cumulative frequency of 99.6%. The case, with fully mechanical controlled, intermittent regime, monthly single heating/cooling operative set values, consumes the minimum energy with specific satisfaction energy consumption of $2.04 \text{ kWh/m}^2/\%KF$.

Keywords: thermal comfort, energy consumption, PMV, Fanger and adaptive method

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Avrupa Birliği'nde binalarda enerji tüketiminin azaltılması amacıyla yayınlanan DIRECTIVE 2002/92/EC [1], her üye ülkenin binaların enerji performansının hesaplanması için bir metot geliştirmesini öngörmekte ve bu metotta enerji ihtiyaçlarının belirlenmesinde iç ısı konfor koşullarının gözetilmesini şart koşmaktadır. Binalarda ısı konfor ve iç hava kalitesinin belirlenmesine yönelik olarak kullanılan standartlar EN ISO 7730 [2], CR 1752 [3], ASHRAE 55-2013 [4] ve TS 2164 [5]'dir.

Binaların ısıtma ve soğutma enerji ihtiyacı/tüketimi, ısı konfor ihtiyacına bağlı olarak değişir ve bu nedenle ısı konfor seviyesinin net bir şekilde tanımlanması önemlidir. Binalarda enerji performansı ile konfor seviyesinin ilişkilendirilmesi üzerine yapılmış pek çok çalışma mevcuttur [6-15]. Isı konfor seviyesinin sınıflandırılması ve sertifikasyonu prEN 15251 [16] standardı tarafından yapılmaktadır. Bu standart, HVAC sistem tasarımında kullanılacak

ısı konfor parametrelerinin belirlenmesinin yanısıra ölçüm ve hesaplamalardan kaynaklanan uzun vadeli ısı konfor değerlendirme metodlarını da tanımlar. Isı konfor seviyesi 4 kategoride sınıflandırılır: I. kategori, ısı konfor açısından en yüksek beklenti seviyesini, dolayısı ile en yüksek memnuniyet seviyesini ($-0,2 < PMV < +0,2$) gösterir. Engelli, hasta kişiler, yaşlılar ve çocukların bulunduğu hacimler için tavsiye edilir. II. kategori, yeni ve tadilat görmüş binalar için kullanılır ve normal beklenti seviyesine karşılık gelir. Bu kategori için $-0,5 < PMV < +0,5$ aralığı önerilir ki standartlarda ve uygulamalarda yaygın olarak kullanılan ısı konfor aralığıdır [2, 6, 13, 17-19] ve Beklenen Memnuniyetsizlik Yüzdesi (Predicted Percentage Dissatisfied - PPD) göstergesi % 10'un altındadır. Havalandırma Binalar için - Bina İç Ortamlar İçin Tasarım Kuralları standardı olan CR 1752 [3]'ye göre bu aralık Kategori B olarak tanımlanır.

Konfor koşulları; hava sıcaklığı, bağıl nemi ve hızının yanı sıra hacmi çevreleyen yüzeyler ile hacim içinde yer alan objelerin yüzey sıcaklıkları (ortalama radyasyon sıcaklığı) ile doğrudan

ilişkilidir. Hava sıcaklığı ile ortalama radyasyon sıcaklığının kombinasyonundan oluşan operatif sıcaklık, ısı konforunun tanımlanması için önemli bir sıcaklıktır [2], [4], [17]. İnsan vücudu operatif sıcaklığa karşı daha hassastır ve bu nedenle ASHRAE 55 [4] ve EN ISO 7730 [2]'de ısı konfor sıcaklığı olarak "operatif sıcaklık" değerleri verilmiştir. Her bir kategori için, değişen PMV aralıklarına karşılık gelen ve hacimde yaşayanların hareket düzeyi ve giyim şekline bağlı ve ısı konforunun tanımlanması için önemli bir sıcaklık olan operatif sıcaklıklar belirlenebilir [20-21].

Isıl konfor ve bunun enerji tüketimi ile ilişkisi, ısı konforu sağlayan HVAC sistem stratejilerine (mekanik, doğal, hibrit) bağlı olarak analiz edilir. Bu stratejiler kullanıcı beklentileri ve davranışlarına bağlıdır. Fanger ısı konfor modeli, kullanıcı müdahalesine izin vermeyen kontrollü bir HVAC sisteminin mevcut olduğu, tamamen kapalı (doğal havalandırmanın mümkün olmadığı) bir iklim çemberinde bulunan kişiler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar ile geliştirilmiştir. Bu nedenle merkezi HVAC sistemi bulunan binaların ısı konfor değerlendirmeleri PMV indeksine dayanan Fanger modeli [4, 17, 22-24] ile belirlenir. Öte yandan saha çalışmaları pencerelerin açılabilirdiği (doğal havalandırmanın olduğu), kullanıcı müdahalesine izin veren HVAC sistemlerinin kullanıldığı binalarda, kişilerin ısı konforunun, Fanger modelinden farklı şekilde değerlendirildiği görülmüştür. Bütünüyle mekanik olarak kontrol edilmeyen binalarda, kullanıcıların ısı konfor sıcaklığı aralığı beklentileri Fanger teorisi ile elde edilen aralığa göre daha geniştir ve kullanıcılar kendilerini psikolojik, fizyolojik ve davranışsal olarak dış ortam koşullarına adapte ederler. Bu nedenle doğal havalandırmanın olduğu binalarda "dinamik" adaptif konfor yaklaşımı kullanımı [18, 25-30] ya da genişletilmiş PMV modeli [31] önerilmektedir. Adaptif konfor yaklaşımının kullanımında "kişisel kontrol" önemlidir [32]. Kişiler giyim durumlarını ya da pencere açarak ortamın hava hızını artırarak ısı konfor koşulları kontrol edebilirler [33]. Özellikle yaz aylarında pencerelerin açılması dolayısıyla gerçekleşen doğal havalandırma ile PMV modeli ile belirlenen sıcaklıklardan daha yüksek iç hava sıcaklıklarında kişiler konforlu hissedebilmektedir. Bu da enerji tüketiminin azalması anlamına gelir [27].

İnsan vücudu operatif sıcaklığa daha hassas olmasına rağmen, operatif sıcaklığı ölçen termometrelerin pahalı ve büyük boyutlu olması,

operatif sıcaklığın hacmin farklı noktalarında farklı olması gibi nedenlerden kaynaklanan ölçüm problemleri HVAC sistem kontrollerinin hava sıcaklığına göre yapılmasına neden olmaktadır [12, 34-35]. Operatif sıcaklığın ölçülmesindeki zorluklar, ölçümü kolay olan (dış hava sıcaklığı, enerji tüketimi, zaman vb.) parametreler kullanılarak tahmin edilmesi yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmiştir. Bu yöntemlerden biri de incelenen hacmin ya da binanın yapay sınır ağları ile modellenmesidir. Yapılan çalışmalarda ölçüm değerleri ile karşılaştırıldığında operatif sıcaklık tahminlerinin kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmüştür [36].

Türkiye'de binalarda enerji performansı çalışmaları, TS 825 [37]'nin zorunlu hale gelmesi ile 2000'li yıllarda başlamış olup ısıtma ve soğutma sezonlarında iç ortam set sıcaklığının sabit tutularak binaların enerji ihtiyacı/tüketimleri ile bu ihtiyaç/tüketimleri azaltacak önlemlerin simüle edilmesini içermektedir [38-41].

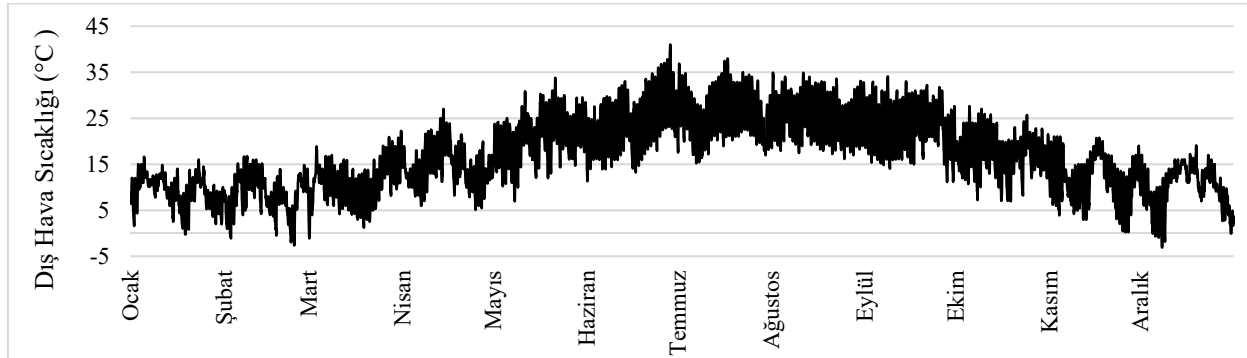
İstanbul'da bir ofis binasının ısıtma/soğutma enerji ihtiyacı EnergyPlus yazılımı ile simüle edilmiş ve bina yönetim sisteminden alınan ölçüm verileri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca aynı ofis binasının Türkiye'nin dört farklı iklim bölgesinden seçilen İstanbul, Ankara, İzmir ve Antalya illerinde bulunması durumlarında alınabilecek enerji tasarrufu önlemleri yine EnergyPlus yardımı ile belirlenmiştir. Ofislerde iç hava sıcaklıkları ısıtma ve soğutma sezonları için set edilmiş ve bu sıcaklıklarda dış hava sıcaklıkları, yalıtım, bina görüş faktörü, dış yüzeylerin rengi, gölgeleme, ventilasyon hızı ve farklı dış hava kontrol stratejilerinin ısıtma/soğutma ihtiyacına olan etkileri belirlenmiştir [38].

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü'ne ait bir binada ısıtma ve soğutma sezonlarında iç hava sıcaklığı sabit tutularak binanın enerji tüketimleri Ecotect ve EnergyPlus yazılımları ile belirlenmiş, ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve tüketimlerin azaltılması yönünde alınabilecek önlemler simüle edilmiştir [42]. Balıkesir Üniversitesi'nde yapılan çalışmada, üniversiteye ait bir binada enerji tüketim verileri toplanmış, tüketim değerlerinin binaya yalıtım uygulanması, kazan veriminin artırılması ve doğal aydınlatma ile gerçekleşecek enerji tasarrufu ile azaltılması ve buna bağlı olarak gerçekleşecek sera gazı emisyonlarındaki düşüş belirlenmiştir [43]. Bir diğer çalışma ise Uludağ Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Isı Tekniği Laboratuvarında bulunan iklimlendirme

DesignBuilder [45] yazılımının veri tabanında Energy Plus (epw) formatında İzmir için saatlik meteorolojik veriler mevcuttur (Şekil 2).

İncelenen örnek konutta 4 kişilik bir ailenin yaşadığı ve ailenin konutta bulunduğu saatler

Tablo 2’de verildiği şekilde kabul edilmiştir. Tablo 2’ye göre aile yılın %73’ünü (6411 saat) konutta geçirmektedir. HVAC sisteminin kesikli çalışma durumundaki çalışma saatleri de ailenin konutta bulunduğu saatler göz önüne alınarak belirlenmiş ve Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 2. İzmir ili için Energy Plus (epw) formatında saatlik dış hava sıcaklığı (Hourly outdoor temperature in Energy Plus (epw) format for Izmir province.)

Tablo 2. Ailenin konutta bulunduğu saatler ve HVAC sistemi çalışma saatleri (kesikli) (Occupancy hours and operating hours of HVAC system).

Ailenin konutta bulunduğu saatler	Hafta içi	Hafta sonu
	18:00-08:00	Tüm gün
Çalışma rejimi	17:00-08:00	Tüm gün
Isıtma	18:00-24:00	11:00-24:00
Soğutma		

- Ailenin konutta bulunma durumuna bağlı olarak değişen metabolik kazançlar, cihaz kullanımı ve aydınlatmadan kaynaklanan iç ısı kazançları TS EN 832 [46]’ye göre konut ortalaması 5 W/m² olacak şekilde belirlenmiştir.

3. YÖNTEM (METHOD)

Çalışmada yapılan başlıca kabuller ve alınan değerler aşağıda listelenmiştir:

- Konuttaki insan yoğunluğu 0,04 kişi/m²’dir.
- Simülasyonlarda, ısıl konforu etkileyen iç mekan iklimsel parametrelerinden olan hava hızı 0,1 m/s’den düşük olarak kabul edilmiş, kişisel parametrelerden olan konut içindeki aktivite seviyesi ise 0,9 met olarak sabit tutulmuştur.
- Çalışmada sıcak su ve aydınlatma enerji tüketimleri dikkate alınmamış, sadece ısıtma ve soğutma enerji tüketimleri incelenmiştir.
- Konutta ısıtma sistemi olarak doğal gaz yakıtlı kazan ve sıcak sulu radyatör sistemi, soğutma sistemi olarak da klima kullanımı öngörülmüştür.
- Konutun ısıtma/soğutma enerji tüketiminin belirlenmesinde doğal gaz ile klimaların elektrik tüketimi dikkate alınmıştır.
- Isıtma/soğutma sisteminde kullanılan fan, pompa vb. yardımcı ekipmanların tüketimi elektrik tüketimine dahil edilmemiştir.
- Isıtma sistem verimi %85, soğutma sistemi COP değeri 3 olarak alınmıştır.

Konutun ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimi arasındaki ilişkinin belirlenebilmesi için, örnek konutun ısıtma/soğutma sistemi, kesikli ve sürekli çalışma rejimi benimsenerek EnergyPlus yazılımında aylık olarak simüle edilmiştir.

EnergyPlus, 2001 yılında ABD Enerji Bakanlığı [47] tarafından geliştirilmiş modüler bir yazılımdır. İki yılda bir yenilenir ve BLAST ile DOE-2’nin en iyi özelliklerinin birleşiminden oluşur. Yazılım ASHRAE Isıl Denge Metodu’nu kullanır. Isıl Denge Metodu; saatlik-dinamik bir metot olup güneş kazançları ve iç kazançların detaylı hesaplanması, iç yüzey sıcaklıklarının her yüzey için ayrı ayrı tanımlanması, doğal havalandırma, gölgeleme, HVAC ekipmanları ve ısıl kütlelerin dahil edilmesi ile fiziksel duruma en yakın ve kabullerin en aza indirildiği, dolayısı ile de gerçeğe en yakın sonuçları verir [48-50]. EnergyPlus, ANSI/ASHRAE 140 [51] doğrulamasına sahiptir.

Bu çalışmada, HVAC sistemleri Fanger ısıl konfor modeline göre tam mekanik kontrollü ve De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak doğal havalandırılmalı olacak

şekilde 2 ana kategoride ele alınmış olup, sıcaklık set değerlerine göre ise 5 alternatif durum için simülasyonlar yapılmıştır. Eğer ısıtma/soğutma sistemleri tek bir sıcaklığa göre değil, belirli bir sıcaklık aralığına göre çalıştırılıyorsa ölü bantlı çift sıcaklık set değeri olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda çalışmada ele alınan simülasyonlar;

- Durum 1: Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 2: Tam mekanik kontrollü, kesikli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma hava sıcaklığı set değeri
- Durum 3: Tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık tek ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 4: Tam mekanik kontrollü, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri
- Durum 5: Doğal havalandırılmalı, sürekli rejim, aylık çift ısıtma/soğutma operatif sıcaklık set değeri

Simülasyonlarda, mekanik kontrollü HVAC sistemlerinde öncelikli olarak operatif termostat bir diğer alternatif olarak hava sıcaklığı set değerleri kullanılmıştır.

Durum 4 olarak adlandırılan alternatifte HVAC sistemleri için iki farklı operatif sıcaklık set değerleri (ölü bantlı çift sıcaklık set değeri) belirlenerek HVAC sistemlerinin bu iki sıcaklık değeri arasında simülasyonları yapılmıştır.

Doğal havalandırmaya dolayısı ile kişisel kontrole izin verilen adaptif konfor yaklaşımında De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak alt ve üst operatif sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

3.1. Sıcaklık set değerlerinin belirlenmesi (Determination of Temperature Set Values)

Her bir simülasyon adımında aylık olarak; ASHRAE 55-2013 [4] ve ISO 7730 [2]'da verilen 19,0-26,5°C ısıtma, 23,5-28,0°C soğutma operatif sıcaklık aralıkları için 1°C'lik sıcaklık adımlarında konut simüle edilmiş ve aylık ortalama PMV değerleri belirlenmiştir. Set sıcaklıkları ile aylık ortalama PMV değerlerinin lineer olarak değiştiği gözlenmiştir. Dolayısı ile simüle edilen her bir ay için Set Sıcaklığı-PMV eğrileri oluşturularak -

0,5<PMV<+0,5 konfor aralığında PMV'yi -0,5, 0 ve +0,5 yapan aylık sıcaklık (operatif, hava) set değerleri belirlenmiştir.

Ölü bantlı çift sıcaklık set değerinin belirlenmesi için kesikli rejimde PMV=0 yapan operatif set sıcaklıkları simülasyonda ölü bantlı çift sıcaklık modunda birincil set sıcaklığı olarak kullanılmıştır. İkincil set sıcaklıkları için ısıtmada PMV'yi -0,5, soğutmada ise PMV'yi +0,5 yapan operatif sıcaklık değerleri kullanılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır.

Doğal havalandırma için %90 kabul edilebilir alt ve üst, operatif sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1 ve 2'de olduğu gibi belirlenir [18, 25-29].

$$\text{ÜSL (üst sıcaklık limiti)} = 0,31 * T_0 + 20,3 \quad (1)$$

$$\text{ASL (alt sıcaklık limiti)} = 0,31 * T_0 + 15,3 \quad (2)$$

$T_0 =$ Dış hava sıcaklığı (°C)

3.2. Saatlik PMV Değerlerinin Belirlenmesi ve İstatistiksel Değerlendirme (Determination of Hourly PMV Values and Statistical Evaluation)

Bir yıl için PMV=0 yapan set sıcaklıkları simülasyonlarda giriş verisi olarak kullanılmış ve ailenin konutta bulunduğu saatler için çalıştırılan simülasyonlardan elde edilen saatlik PMV değerleri çıkış verisi olarak elde edilmiştir. Yıl boyunca elde edilen saatlik PMV değerleri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Frekans dağılımları ve dağılım özellikleri (ortalama değer, orta değer, standard sapma, varyans, en küçük değer, en büyük değer ve aralık) ile ailenin konutta bulunduğu saatlerin % kaçının -0,2<PMV<+0,2 ve -0,5<PMV<+0,5 konfor aralıklarına düştüğü belirlenmiştir.

4. BULGULARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

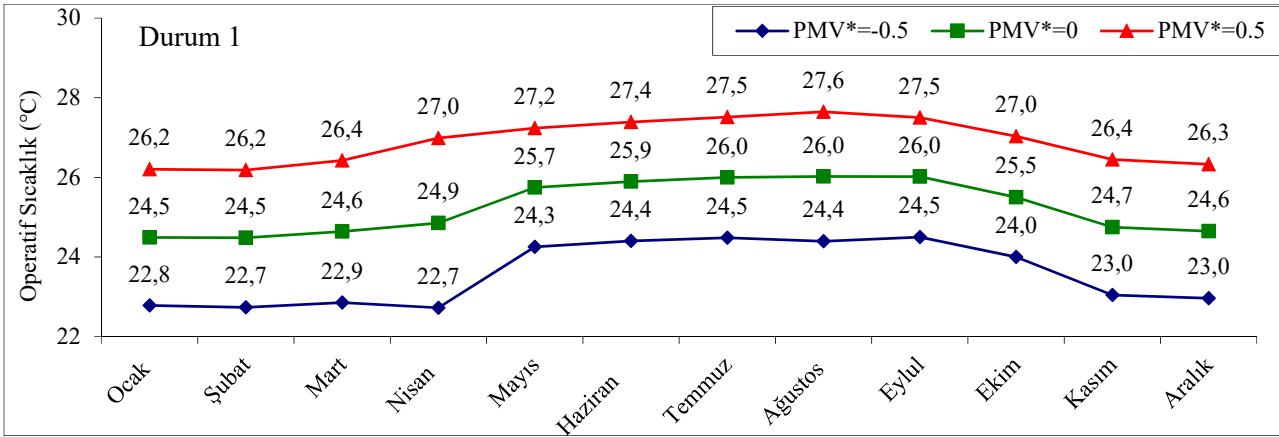
İzmir ilindeki bir konut için ısıtma/soğutma sistemlerinin çalışma şartlarının, ısıl konfor koşulları ile enerji tüketimlerine etkisi 5 farklı durum analiz edilmiştir. Dinamik simülasyon yöntemlerinden olan EnergyPlus ve arayüz olarak Design Builder kullanılarak yapılan toplam 540 simülasyon ile öncelikle ısıtma/soğutma sistemlerinin sıcaklık set değerleri belirlenerek,

daha sonra elde edilen bu set değerlerinin kullanılması ile her bir durumun birim ısıtma/soğutma enerji tüketimleri, yıllık birim birincil enerji tüketimi, yıl boyunca ailenin evde bulunduğu saatlerde sağlanan PMV değerleri ve PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir.

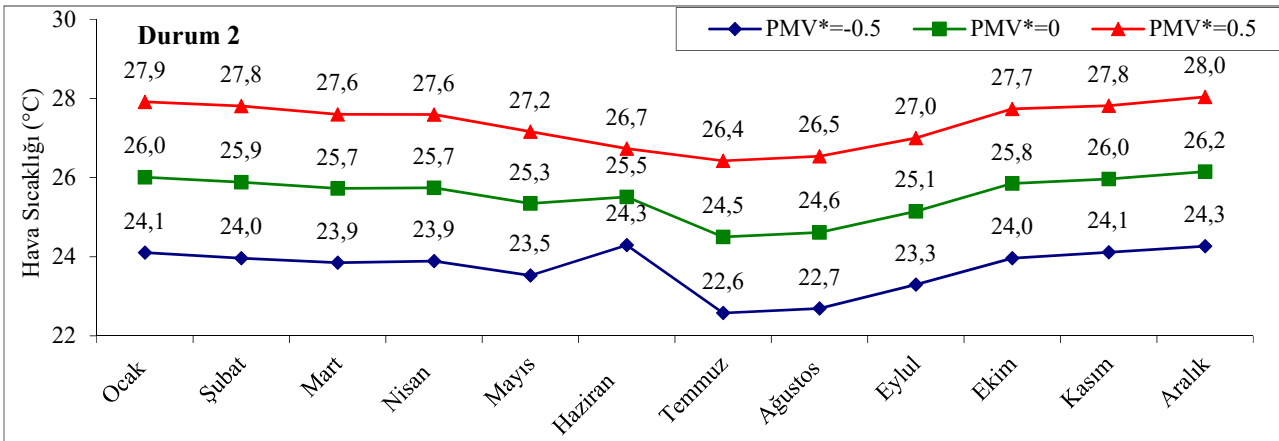
4.1. Sıcaklık Set Değerlerinin Belirlenmesi (Determination of Temperature Set Values)

Durum 1, 2 ve 3 için $PMV=-0,5$, 0 ve $+0,5$ 'i sağlayan ısıtma/soğutma sisteminin aylık tek sıcaklık set değerleri belirlenmiş ve sırasıyla Şekil 3, 4 ve 5'te verilmiştir. Aylık set sıcaklıkları,

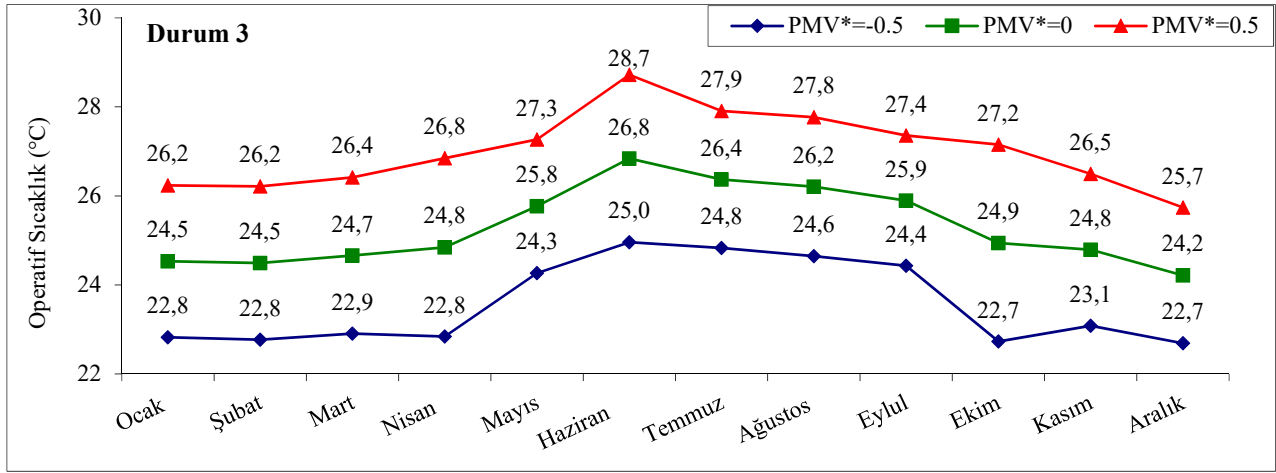
Durum 1 için $24,5-26,0^{\circ}C$ (operatif), Durum 2 için $24,5-26,2^{\circ}C$ (hava) ve Durum 3 için $24,2-26,8^{\circ}C$ (operatif), arasında değişmektedir. Her üç Durum için belirlenen set sıcaklık aralıkları birbirleri ile yaklaşık aynı görünmesine rağmen, Şekil 3, 4 ve 5'ten açıkça görüldüğü üzere Durum 2'de belirlenen set sıcaklıklarının eğilimi, Durum 1 ve Durum 3'e göre farklılık göstermektedir. Bunun nedeni Durum 2'de hava sıcaklık set değerlerinin kullanılmasının olduğu düşünülmektedir. Hava set sıcaklık değerinin kullanılması ile operatif sıcaklık değerlerine göre set sıcaklık değerlerinde mevsimsel farklılıklar oluşmaktadır. Yani ısıtma dönemlerinde set sıcaklıkları artarken, soğutma dönemleri için sıcaklıkların düştüğü gözlenmektedir.



Şekil 3. Durum 1 operatif sıcaklık set değerleri ($^{\circ}C$) (Case 1 operative temperature set values ($^{\circ}C$))



Şekil 4. Durum 2 hava sıcaklığı set değerleri ($^{\circ}C$) (Case 2 air temperature set values ($^{\circ}C$))



Şekil 5. Durum 3 operatif sıcaklık set değerleri (°C) (Case 3 operative temperature set values (°C))

Durum 4 için, ölü bantlı çift sıcaklık modunda birincil set sıcaklığı olarak kesikli rejimde PMV=0 yapan operatif sıcaklıklar, ikincil set sıcaklıkları için ısıtmada PMV'yi -0,5, soğutmada ise PMV'yi +0,5 yapan operatif sıcaklık değerleri kullanılmış ve simülasyonlar tekrarlanmıştır. Örnek olarak Şekil 3'de İzmir ili için Eylül ayı ısıtma/soğutma birincil set sıcaklığı 26,0°C, ikincil set sıcaklıkları ısıtma için 24,5°C, soğutma için 27,5°C alınmıştır. Durum 4 için ölü bantlı çift sıcaklık değerleri, HVAC sistemi ısıtma sezonunda 24,5-26°C, soğutma sezonunda ise 26,0-27,5°C olarak alınmıştır.

Durum 5 için De Dear [18, 25-29] tarafından önerilen adaptif konfor teorisi kullanılarak aylık alt ve üst sıcaklık set değerleri dış ortam sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Eşitlik 1 ve 2'ye göre hesaplanmış ve Tablo 3'te verilmiştir.

4.2. PMV Değerleri ve İstatistiksel Değerlendirme (PMV Values and Statistical Evaluation)

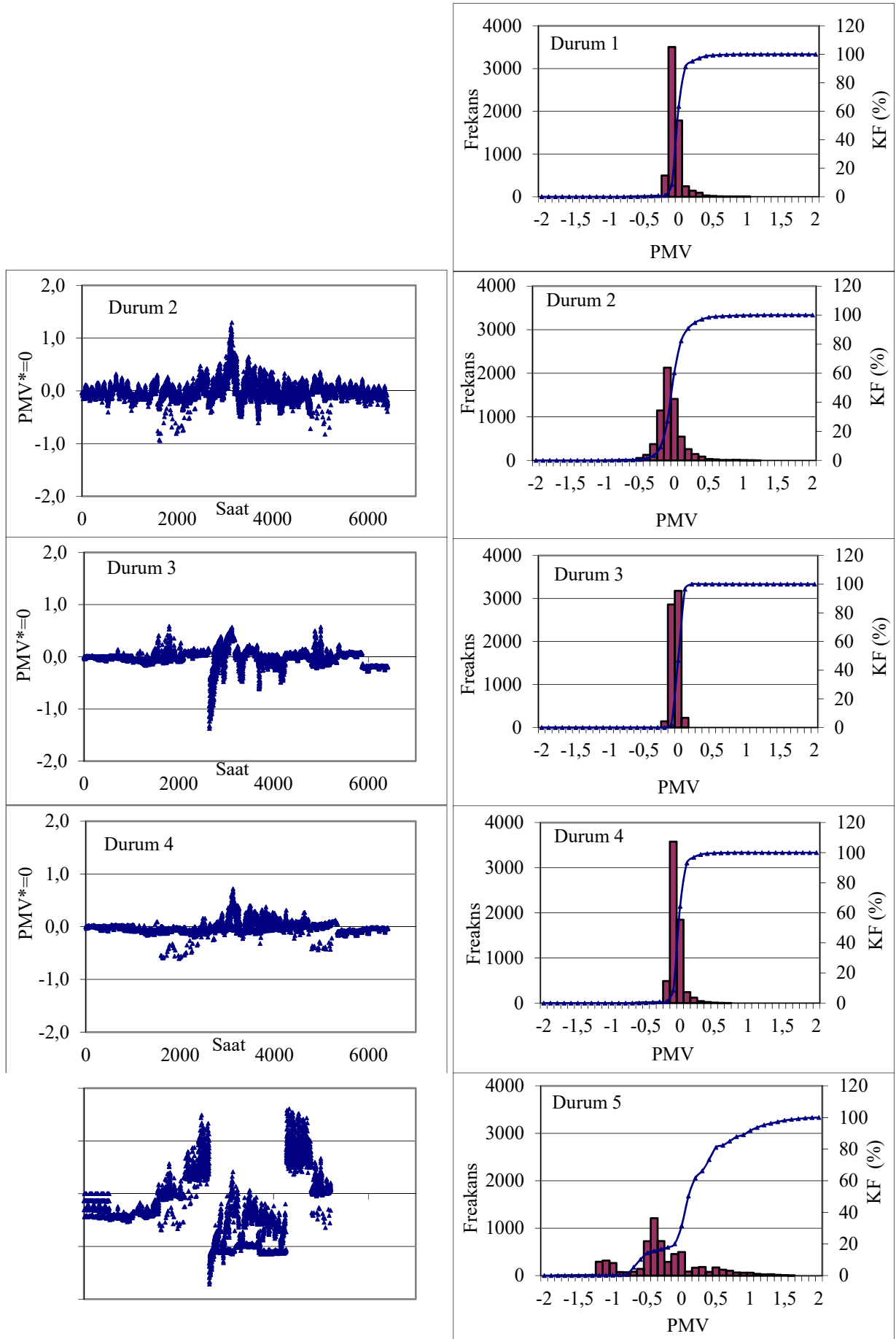
Durum 1, 2 ve 3 için PMV=0 yapan tek sıcaklık set değerleri, Durum 4 ve 5 için de belirlenen çift sıcaklık set değerleri kullanılarak çalıştırılan simülasyonlarda ailenin konutta bulunduğu saatler için elde edilen saatlik PMV değerleri (çıkış verisi) Şekil 6'da verilmiştir. Saatlik PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi sonucu PMV dağılım frekansları ve kümülatif frekansları da Şekil 6'da, dağılım özellikleri ise Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 3. Durum 5 alt ve üst operatif sıcaklık set değeri (°C) (Case 3 lower and upper operative temperature set values (°C)).

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
ASL	18,1	17,9	18,6	19,8	21,8	22,9	23,3	23,2	22,4	20,6	18,8	18,3
ÜSL	23,1	22,9	23,6	24,8	26,8	27,9	28,3	28,2	27,4	25,6	23,8	23,3

Tablo 4. Saatlik PMV değerlerinin istatistiksel değerlendirilmesi (Statistical evaluation of hourly PMV values)

	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5
Ortalama	-0,0087	-0,012	-0,3885	-0,0156	-0,224
Ortakdaki değer	-0,0299	-0,0304	-0,4205	-0,0275	-0,3022
Standard sapma	0,1167	0,1839	0,3514	0,095	0,5327
Varyans	0,0136	0,0338	0,1235	0,0090	0,2838
En küçük değer	-0,6890	-0,9464	-1,1355	-0,6062	-1,7166
En büyük değer	1,0122	1,2973	0,8669	0,7204	1,6062
Aralık	1,70	2,24	2,00	1,33	3,32
-0,2<PMV<+0,2	94,1	81,6	89,8	96,0	20,7
-0,5<PMV<+0,5	98,9	97,9	98,5	99,6	68,9



Şekil 6. Saatlik PMV değerleri ve PMV dağılım frekansları ve kümülatif frekansları (Hourly PMV values and PMV distribution frequencies and cumulative frequencies) (KF: Kümülatif Frekans)

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 07.10.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 14.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.342278	

Yeni bir 4-boyutlu tedarik zinciri sisteminde hiperkaos

Gültekin Çağıl^{*1}, Neslihan Açıkgöz

ÖZ

Tedarik zinciri, müşteri ihtiyaçlarını karşılayabilmek için hammadde tedarikinden başlayarak müşteriye ürün teslimine kadar devam eden tüm süreçlerdeki birçok faktörün etkisi altında olması bakımından karmaşık ve kaotik bir yapıya sahiptir. Kaotik tedarik zinciri, sistemi oluşturan değişkenlerin beklenmedik bazı davranışlar sergilemesi ve bu davranışların uzun süreli tahminlerinin yapılamaması anlamına gelmektedir. Literatürde farklı tedarik zinciri sistemlerinin matematiksel modelleri oluşturularak kaotik yapılarının incelendiği çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmada ilk kez daha önce sunulan bir tedarik zinciri modelinin talep durum denklemine lineer kontrolör eklenmiş ve oluşturulan bu yeni tedarik zinciri sisteminin hiperkaotik davranış sergilediği görülmüştür. Elde edilen yeni 4 boyutlu hiperkaotik sistemin Matlab-Simulink programı kullanılarak sayısal analizleri yapılmış ve hiperkaotik davranışı faz portreleri ile ortaya konmuştur. Faz portresinde krank mili ya da çok katlı kelebek kanadı gibi bir şekle benzeyen kaotik bir çekici olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda tedarik zinciri sisteminde farklı davranışların meydana gelmesine neden olan yeni terimin müşteri sadakati olarak tanımlanabileceği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Tedarik Zincirinde Kaos, Tedarik Zincirinde Hiperkaos

Hyperchaos in a new 4d supply chain system

ABSTRACT

The supply chain has a complex and chaotic structure in that it is under the influence of many factors in all the processes from raw material supply to customer delivery in order to meet customer needs. Chaotic supply chain means that the variables that make up the system exhibit some unexpected behaviors and can not make long-term predictions of these behaviors. In the literature, there are studies in which chaotic structures are examined by creating mathematical models of different supply chain systems. In this study, a linear controller was added to the demand state equation of a previously presented supply chain model for the first time and it is seen that this new supply chain system exhibited hyperchaotic behavior. Numerical analysis of the new 4-dimensional hyperchaotic system was examined by using Matlab-Simulink program and hyperchaotic behavior was revealed with phase-portraits. It has been observed that there is a chaotic attractor similar to a crankshaft or multi-layered butterfly wing in phase portrait. As a result of the study, it is emphasized that the new term that leads to different behaviors in the supply chain system can be defined as "customer loyalty".

Keywords: Supply Chain Chaos, Supply Chain Hyperchaos

¹ Sakarya Üniversitesi, cagil@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1979 yılında Poincaré tarafından ilk kez ortaya atılan hiperkaotik bir sistem, kaos sisteminden daha karmaşık ve tahmin edilmesi daha zor davranışlar sergilemesi bakımından incelemeye değer bulunmuştur [1]. Günümüzde bu alanda birçok çalışma mevcut olup kaotik bir sisteme eklenen doğrusal ya da doğrusal olmayan bir kontrolör ile elde edilen 4 boyutlu sistemin çok katmanlı kaotik davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Çalışmalar içerisinde bu yeni hiperkaotik sistemin dinamik davranışları çatalanma diyagramları, Lyapunov üstelleri, faz diyagramları kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca hiperkaosu kontrol etmek ve hiperkaotik sistemlerde hiperkaos senkronizasyonunu [2-3] sağlamak için de yapılmış çalışmalar mevcuttur.

Zheng, Dou ve arkadaşları, Di ve arkadaşları, Ding ve arkadaşları hiperkaos kontrolü için geri bildirim kontrol tekniği (feedback control) önermiştir [4-7]. Kocamaz ve arkadaşları ise kontrol ve senkronizasyonda zeki yaklaşımlar kullanmışlardır [8]. Wang ve Wang [9], Lorenz kaotik sistemine doğrusal olmayan bir kontrolör ekleyerek 4 boyutlu bir hiperkaotik Lorenz sistemi ortaya koymuş ve çatalanma diyagramları, lyapunov üstelleri ve faz diyagramlarını incelemiştir. Bir başka çalışmada yeni dört boyutlu otonom bir sistemin modeli sunulmuş ve sayısal simülasyon sonucunda hiperkaos oluşumu faz portreleri ile gösterilmiştir [10]. El-sayed ve arkadaşları [11] yeni bir 4-boyutlu hiperkaotik sistem sunmuş ve dinamik davranışlarını incelemişlerdir.

Bu çalışmanın diğerlerinden en önemli farkı kaotik bir yapıya sahip 3 boyutlu (talep, stok ve üretim miktarı) bir tedarik zinciri kaotik sistemine bir doğrusal kontrolör eklenerek oluşturulan 4 boyutlu yeni sistemin hiperkaotik davranışlar sergilediğinin ortaya konmasıdır. Tedarik zinciri sistemi yapısı itibarıyla birçok üyesi ve üyeler arasında etkileşimlerin bulunduğu karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu yapıya eklenen her bir yeni üye veya üyeler arasındaki yeni bir ilişki, çok katmanlı ve kaostan daha kompleks bir yapı olan hiperkaotik davranışlar sergilenmesine neden olabilmektedir.

Bu çalışmanın 2. ve 3. Bölüm 'ünde tedarik zinciri, kaos ve hiperkaos kavramları açıklanmıştır. Bölüm4'te mevcut bir tedarik zinciri modeli

tanıtılmış, eklenen bir kontrolör ile oluşturulan yeni hiperkaotik tedarik zinciri sistemi Bölüm5' te sunulmuştur. Bu bölümde ayrıca Matlab simülasyonu kullanılarak çizdirilen faz portrelerine de yer verilmiştir. Son bölümde ise çalışmanın sonucu paylaşılmıştır.

2. TEDARİK ZİNCİRİ (SUPPLY CHAIN)

Hammaddeden müşteriye ürün teslimine kadar tüm süreç elemanları (tedarikçiler, üreticiler, distribütörler, perakendeciler, toptancılar, müşteriler) ile ürün ve aralarındaki bilgi akışı da dahil olmak üzere tüm bu karmaşık süreç tedarik zinciri olarak tanımlanmaktadır. Literatürde tanımlanan tedarik zincirini oluşturan süreçler [12] içerisinde gerçekleştirilen tüm faaliyetlerin doğru planlanması ve birbirleriyle uyum içerisinde gerçekleştirilmesi sürecin başarısını olumlu yönde etkilemektedir. Rekabet ortamında müşteri ihtiyaçlarının en hızlı ve en doğru şekilde karşılanabilmesinin önemi yadsınamaz. İyi planlanmış ve iyi yönetilen bir tedarik zinciri sistemi ile akışların hızlanması sağlanabilmektedir.

Üründen ürüne farklılık gösterebilecek tedarik zincirinin amaçları; tedarik süresini kısaltmak, maliyeti azaltmak, müşteri tatmin düzeyini, rekabet gücünü ve karlılığı arttırmak gibi çeşitlenebilmektedir. Zincir üyesi işletmelerin işbirliği ve bilgi paylaşımı zincirin büyük, tek bir işletme olarak yönetilmesi, zincirin başarısını arttıracaktır. Örneğin müşteri istek ve ihtiyaçlarını en iyi şekilde görebilecek olan perakendecilerden alınan bilgiler ışığında imalatçılar ürünlerini ihtiyaca göre ve ihtiyaç miktarınca üretebilecek, iadelerde ve stok miktarında azalmalar görülecektir.

Tedarik zinciri yapısı ürüne veya sektöre göre farklı şekillerde oluşturulabilir. Bir üretim işletmesi için hammadde tedarikçileri, yarı mamül üreticileri, nihai ürün üreticileri, toptancılar dağıtım merkezleri, perakendeciler, müşterilerden oluşan 6 aşamalı bir tedarik zinciri sistemi olabileceği gibi; bir otel işletmesi için tedarikçi, işletme ve müşteriler şeklinde 3 aşamalı yapı da olabilmektedir. En basit hali olarak tanımlanan 3 aşamalı bu yapıya yeni, tedarikçilerin tedarikçileri, müşterilerin müşterileri gibi elemanların eklenmesi, geliştirilmiş tedarik zinciri sistemi olarak adlandırılmaktadır.

Tedarik zinciri yönetimi, süreç elemanlarının en iyi şekilde yönetilebilmesi için tedarik zinciri sürecinin en iyilenmesi konusu üzerinde durur. Bunu matematiksel modeller ile gerçekleştirmeye çalışan birçok çalışma mevcuttur [13].

3. KAOS VE HIPERKAOS (CHAOS AND HYPERCHAOS)

Kaos, bir sistemden doğan, periyodik olmayan, davranışın bileşenleri arasındaki etkileşimi kestirilemeyen ve başlangıç koşullarına hassas bağımlılık gösteren davranıştır [14]. Kısaca kaos bir sistem davranışdır ve sistemdeki doğrusal olmayan, belirsiz davranışların sistemi kestirilemez duruma sokması halidir. Başlangıç koşullarındaki önem verilmeyen değişkenlerin sonuçlar üzerindeki belirlenemeyen etkileridir. "Kelebek etkisi" olarak tanımlanmış olan ve kaos teorisinin özünü oluşturan bu durumu tedarik zinciri açısından ele alan Grabinski [15], çalışmasında aşağıdaki ifadeyi kullanmıştır:

"Kelebek kanat etkisi yerine bir forklift sürücü etkisi bulabilirsiniz: tedarik zincirinin ayrıntıları belli bir forklift sürücüsünün yemek molasını bitirme zamanındaki ağırlığına bağlı olacaktır."

Literatürde Levy [16] gibi çok az sayıda çalışma küçük bir adım sonrasını tahmin etmek üzerine olsa da uzun süreli tahminlerin mümkün olmadığı açıklanmıştır.

Nonlineerlik kaosun vazgeçilmezi olsa da tedarik zinciri içerisinde nadiren bulunur. Nonlinear dinamiklerin klasik bir üretim-dağıtım sistemi probleminde nasıl uygulandığı Larsen ve diğerleri [17] tarafından incelenmiştir. Onlara göre zincirin basit yapısına rağmen insan karar vermesindeki karmaşık yapı nonlineerliğin altındaki önemli bir noktadır. Wang ve diğerleri [18], tedarik zincirinde nonlineerliğin dinamik davranışlarının çeşitli durumlara göre yüksek-düşük maliyet kategorizasyonu yapmış ve envanter sisteminde özellikle teslim süresindeki (lead time) nonlineerlik [19] üzerinde durmuştur.

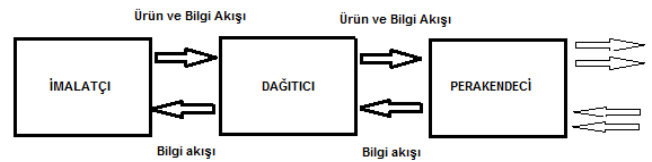
Bir sistemin periyodik, istikrarlı, yarı-periyodik veya kaotik olup olmadığını; kısacası sistemin dinamik davranışlarını inceleyebilmek için, zaman serisi grafikleri, faz uzayı grafikleri, haritalar ve güç spektrumu, lyapunov üsteli (LE), entropi, fraktal boyut, kapasite boyut ve korelasyon boyutu yaygın olarak kullanılan grafik ve nicel yöntemlere örnek olarak verilebilir [20].

Lyapunov üsteli, başlangıç koşullarına bağılıktaki hassasiyeti sayısal olarak ifade eder. Üç boyutlu bir faz uzayında en az bir pozitif lyapunov üsteline sahip sistemin kaotik davranış sergilediği söylenir. Hiperkaotik sistemlerin davranışı ve analizi, yalnızca tek bir pozitif Lyapunov üssü olan kaotik sistemlerin durumundan çok daha karmaşıktır [21]. Bunun iki sebebi vardır: birincisi hiperkaotik durum için dördüncü boyuta ihtiyaç vardır, ikincisi ise birden fazla yayılma yönünün varlığı, sistemin daha geniş bir çatı altına sahip olmasını sağlar. Aslında hiperkaos, üç boyutlu bir akış içerisindeki iki boyutun dördüncü boyut yoluyla yeniden farklı yönde (ikinci bir yönde) genişlemesi olarak tanımlanabilir.

Son zamanlarda hiperkaos üretimi araştırmacıların dikkatini çekmiştir [22]. Rössler sistemi haricinde, kaotik bir sisteme bir geribildirim denetleyicisi getirerek oluşturulan birçok sürekli hiperkaotik sistem bulunmuştur [23-28].

4. KAOTİK TEDARİK ZİNCİRİ SİSTEMİ

Tedarik zinciri yönetimi sürecini matematiksel olarak modelleyen Zhang ve arkadaşları [29] çalışmalarında, aşağıda görüldüğü şekliyle, üç denklemden oluşan bir diferansiyel denklem sistemi ile tedarik zincirinin dinamik bir modelini sunmuşlardır. Modelde üç durum değişkeni tanımlanmıştır: talep (x), stok (y) ve üretim miktarı (z). Modelin oluşturulması ile ilgili ayrıntılı bilgiler Zhang ve arkadaşları [29]'na ait çalışmadan elde edilebilir. Şekil 1'de aşağıda verilmiş diferansiyel denklem sistemi (1) 'e ait üç aşamalı tedarik zinciri sistemi verilmiştir. Bu modelin oluşturulduğu tedarik zinciri sistemi imalatçı, dağıtıcı ve perakendeciden oluşan 3 aşamalı bir yapıya sahiptir.

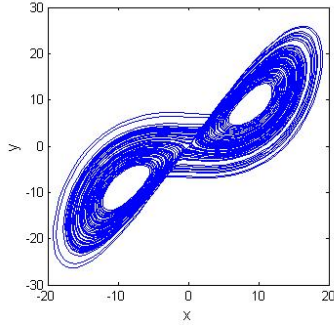


Şekil 1. 3 Aşamalı bir tedarik zinciri örneği

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (m + \delta m)y - (n + 1 + \delta n)x + d_1 \\ \dot{y} &= (r + \delta r)x - y - xz + d_2 \\ \dot{z} &= xy + (k - 1 - \delta k)z + d_3 \end{aligned} \quad (1)$$

Zhang ve arkadaşları [29] tarafından, yukarıda verilen sistem (1) in, parametrelerine ve başlangıç şartlarına bağlı olarak kaotik davranış sergilediği

Şekil 2' deki tedarik zincirine ait kaotik çekicinin (x-y) faz portresi ile ortaya konmuştur. Faz portresi, faz uzayının iki boyutlu bir projeksiyonudur [30] ve durum değişkeninin her birinin anlık durumunu birbirine temsil eder [31].



Şekil 2. x-y faz portresi

5. HIPERKAOTİK TEDARİK ZİNCİRİ SİSTEMİ

Bu çalışmada "u" şeklinde tanımladığımız yeni bir terim birinci denkleme eklenmiş ve dört boyutlu doğrusal olmayan dinamik sistem aşağıdaki biçimde elde edilmiştir:

$$\dot{x}=(m+\delta m)y-(n+1+\delta n)x+d_1+u$$

$$\dot{y}=(r+\delta r)x-y-xz+d_2 \quad (2)$$

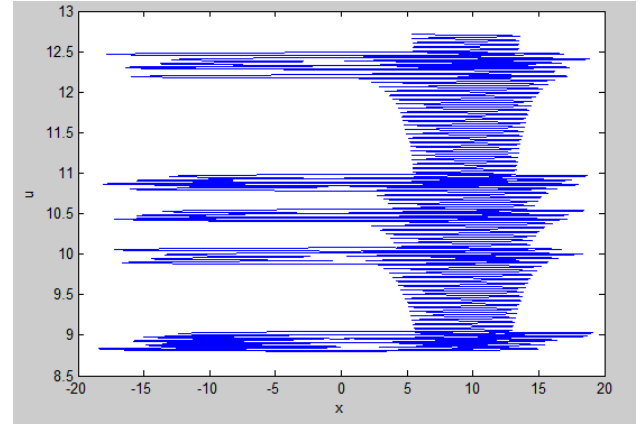
$$\dot{z}=xy+(k-1-\delta k)z+d_3$$

$$\dot{u}=sx$$

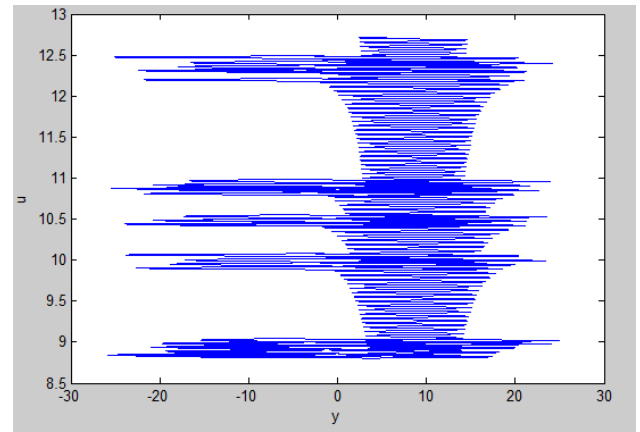
burada "s" yeni bir sabit değerdir.

Kaotik sistem (1) den farklı olarak geliştirilen yeni modelde x,y ve z e ait başlangıç değerleri sırasıyla 0,-0.11 ve 9 şeklinde alınmakla birlikte yeni eklenen değişkenin başlangıç değeri $u(0)=9$ ve $s=0.01$ alındığında sistemin hiperkaotik davranış sergilediği; diğer bir deyişle çok katmanlı bir kaotik yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Hiperkaotik tedarik zinciri sistemine ait 2 boyutlu (x-u), (y-u), (z-u) ile 3 boyutlu (x,y,u) faz portresi sırasıyla Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekillerde de görüldüğü gibi u değişkeninin eklenmesiyle tedarik zinciri sistemi çok katmanlı kaotik bir davranış sergilemektedir.

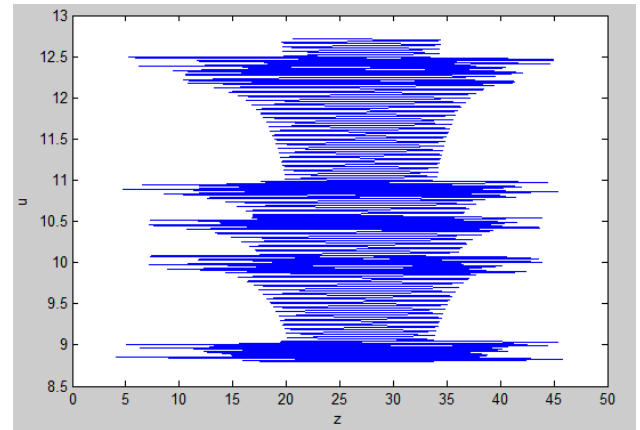
Şekil 4' de ise hiperkaotik tedarik zinciri sisteminin değişkenlerine ait zaman serileri verilmiştir. Yeni eklenen terim "u" ya (müşteri sadakatine) ait zaman serisi grafiği (Şekil 4-d), denklemin doğrusal bir denklem özelliğinde olması sebebi artış eğiliminde olduğu görülmektedir.



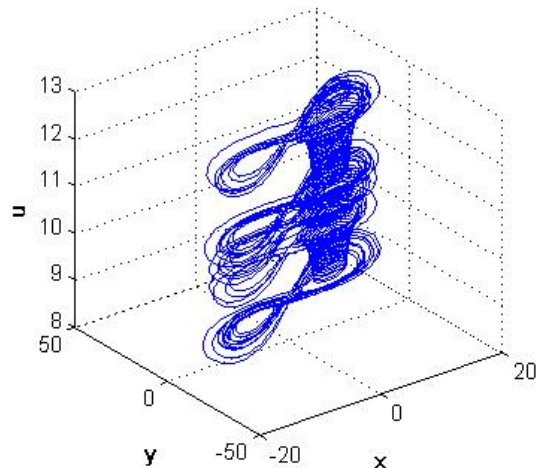
Şekil 3(a). Sistem (2) ye ait (x-u) faz portresi



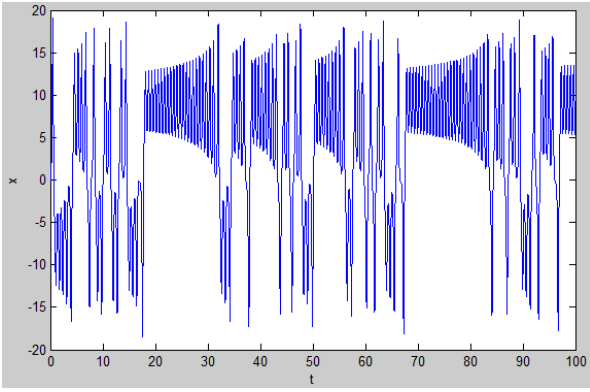
Şekil 3(b). Sistem (2) ye ait (y-u) faz portresi



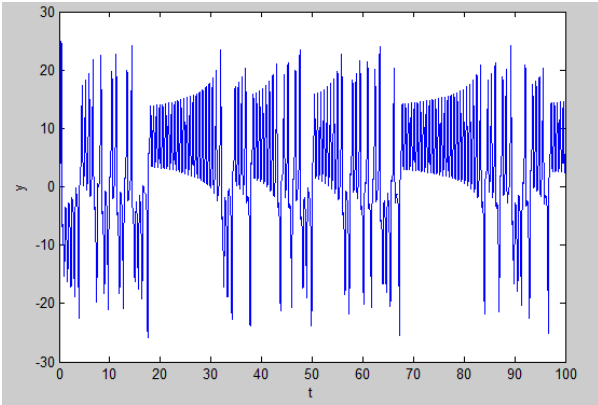
Şekil 3(c). Sistem (2) ye ait (z-u) faz portresi



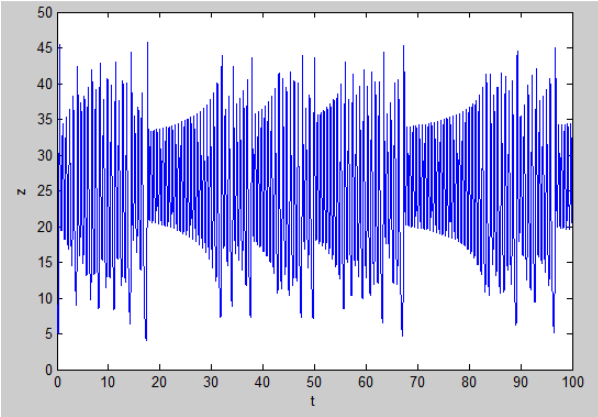
Şekil 3(d). 3 boyutlu (x,y,u) hiperkaotik faz portresi.



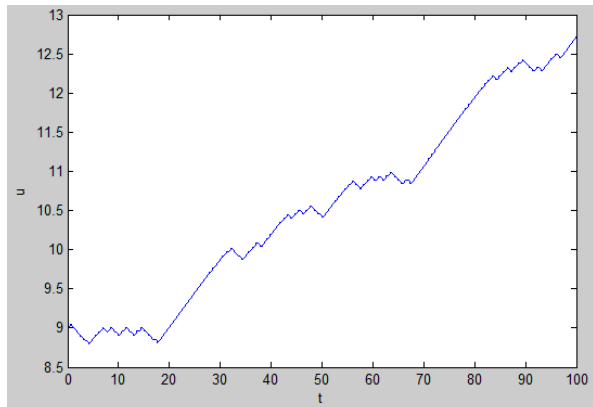
Şekil 4(a). Hiperkaotik tedarik zinciri sisteminde x değişkenine ait zaman serisi



Şekil 4(b). Hiperkaotik tedarik zinciri sisteminde y değişkenine ait zaman serisi

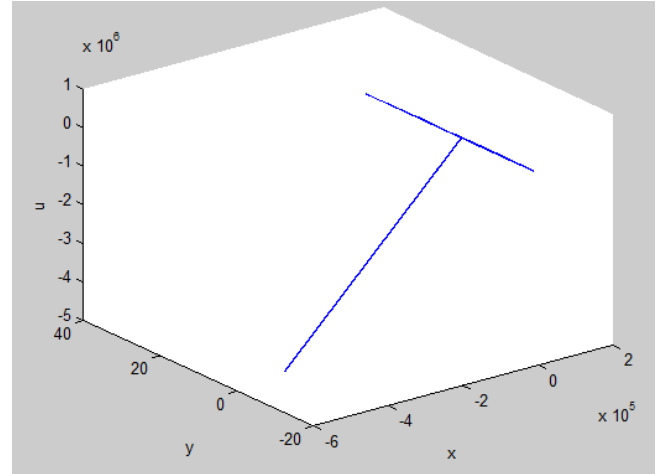


Şekil 4(c). Hiperkaotik tedarik zinciri sisteminde z değişkenine ait zaman serisi

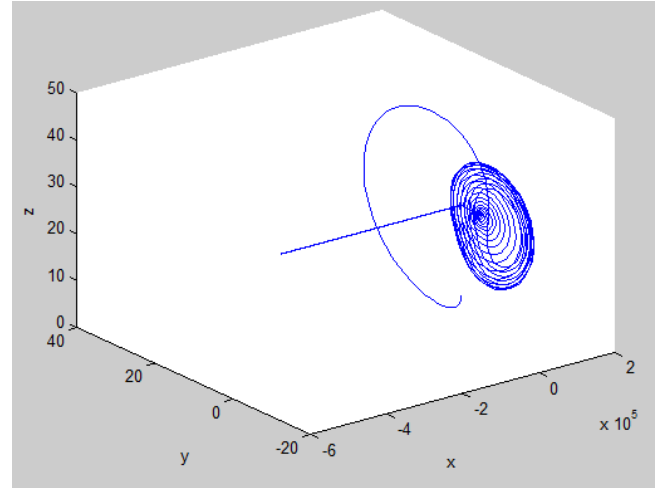


Şekil 4(d). Hiperkaotik tedarik zinciri sisteminde u değişkenine ait zaman serisi

$s > 1.2$ değerleri için sistemin hiperkaotik davranış sergilediği Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 5(a). $S=1.2$ için 3 boyutlu (x,y,u) faz portresi



Şekil 5(b). $S=1.2$ için 3 boyutlu (x,y,z) faz portresi

6. SONUÇ (RESULTS)

Bu makale, hiperkaotik tedarik zinciri sisteminin ilk çalışmalarından biri olmakla birlikte, dördüncü parametre $s=0.01$ alındığında, tedarik zinciri sisteminin hiperkaotik davranış sergilediği gözlemlenmiştir. Üç boyutlu hiperkaotik çekicinin faz uzayı portreleri Matlab simülasyonu kullanılarak elde edilmiştir.

Tedarik zinciri sisteminde özellikle talep denkleminde eklenen bu yeni terim, sisteme çok katmanlı kaotik davranış sergilemesi bakımından önemli görülmüştür. 1. denkleminizde u 'nun denkleme eklenme biçimi dikkate alınır, yeni eklenen " u " teriminin artışından talebin etkilendiği görülecektir. Zaman serisi grafiğinde (şekil 4(d)) de görüldüğü gibi bu etki talep ile pozitif yönde olması bakımında u değişkeni "müşteri sadakati" olarak tanımlanmıştır. Müşteri sadakati, talebi etkileyen önemli bir faktör olmakla birlikte

belirlenemez ve öngörülemez özelliği bakımından sistemde kaotik davranışların sergilenmesinde payı olacağı düşünülmektedir. Bu düşünceyi de faz portresi ile hiperkaotik davranışın gösterildiği Şekil 3(d) desteklemektedir.

Müşteri sadakatinin artması, kaotik yapının azalmasını ve sistemin kararlı duruma yaklaşmasını sağlamaktadır.

REFERENCES

A sample references list is given below;

- [1] O.E. RöSSLer, "An equation for hyperchaos," *Physics Letters A*, vol. 71, no. 2–3, pp. 155–156, 1979.
- [2] X. Wang, J. Song, "Synchronization of the fractional order hyperchaos Lorenz systems with activation feedback control", *Commun Nonlinear Sci Numer Simulat*, vol. 14, pp. 3351–3357, 2009.
- [3] W. Xingyuan, W. Yaşın, "Adaptive generalized synchronization of hyperchaos systems", *International Journal of Modern Physics B*, vol. 25, no. 32, pp. 4563–4571, 2011.
- [4] J. A, Zheng, "Simple universal adaptive feedback controller for chaos and hyperchaos control", *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 61, no. 8, pp. 2000–2004, 2011.
- [5] F. Dou, J. Sun, W. Duan, K. Lu, "Controlling hyperchaos in the new hyperchaotic system", *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, vol. 14, no. 2, pp. 552–559, 2009.
- [6] C. Di, X. Yang, D. Huang, "A new water resources supply-demand system and its hyperchaos control", *Procedia Engineering*, vol. 15, pp. 734 – 738, 2011.
- [7] J. Ding, W. Yang, H. Yao, "A New Modified Hyperchaotic Finance System and its Control", *International Journal of Nonlinear Science*, vol. 8, no. 1, pp. 59-66, 2009.
- [8] U.E.Kocamaz, H.Taşkın, Y.Uyaroğlu, A.Göksu "Control and synchronization of chaotic supply chains using intelligent approaches" *Computers & Industrial Engineering*, vol. 102, pp. 476-487, 2016.
- [9] X. Wang, M. Wang, "A hyperchaos generated from Lorenz system," *Physica A*, vol. 387, no. 14, pp. 3751–3758, 2008.
- [10] W. Wu, Z. Chen, Z. Yuan, "The evolution of a novel four-dimensional autonomous system: Among 3-torus, limit cycle, 2-torus, chaos and hyperchaos", *Chaos, Solitons and Fractals*, vol. 39, no. 5, pp. 2340–2356, 2009.
- [11] A.M.A. El-Sayed, H.M. Nour, A. Elsaid, A.E. Matouk, A. Elsonbaty, "Circuit realization, bifurcations, chaos and hyperchaos in a new 4D system", *Applied Mathematics and Computation*, vol. 239, pp. 333–345, 2014.
- [12] K.L.Croxtan, S.J. Dastugue-Garcia, D.M. Lambert, et All, "The Supply Chain Management Process", *The International Journal of Logistics Management*, vol. 12, no. 2, pp. 13-35, 2001.
- [13] L.W. Snyder, Z. Atan, P. Peng, Y. Rong A.J. Schmitte, B. Sinsoysal, "OR/MS models for supply chain disruptions: a review", *IIE Transactions*, vol. 48, no. 2, pp. 89-109, 2016.
- [14] H. Singh, A. Singh, "Principles of Complexity and Chaos Theory in Project Execution: A New Approach to Management", *Cost Engineering*, vol. 44, no. 12, pp. 23-33, 2002.
- [15] M. Grabinski, "Chaos – Limitation Or Even End Of Supply Chain Management", *High Speed Flow of Material, Information and Capital*, İstanbul, 2008.
- [16] D. Levy, "Chaos Theory And Strategy: Theory, Application, And Managerial Implications", *Strategic Management Journal*, vol. 15, pp. 167-178, 1994.
- [17] E.R. Larsen, J.D.V. Morecroft, J.S. Thomsen, "Complex behaviour in a production-distribution model", *European Journal of Operational Research*, vol. 119, pp. 61-74, 1999.
- [18] X.Wang, S.M. Disney, J. Wang, "Stability analysis of constrained inventory systems with transportation delay", *European Journal of Operational Research*, vol. 223, no. 1, pp. 86 - 95, 2012.
- [19] X. Wang, S.M. Disney, J. Wang, "Exploring the oscillatory dynamics of a forbidden

- returns inventory system", *International Journal of Production Economics*, vol. 147, pp. 3-12, 2014.
- [20] R. C. Hilborn, "Chaos and nonlinear dynamics: an introduction for scientists and engineers". *New York: Oxford University Press*, 1994.
- [21] R. Barri, M.A. Martínez, S. Serrano, D. Wilczak, "When chaos meets hyperchaos: 4D Rössler model", *Physics Letters A*, vol. 379, no. 38, pp.2300-2305, 2015.
- [22] W. Wu, Z. Chen, "Hopf bifurcation and intermittent transition to hyperchaos in a novel strong four-dimensional hyperchaotic system", *Nonlinear Dyn*, vol. 60, pp. 615–630, 2010.
- [23] D. Cafagna, G. Grassi, "New 3D-scroll attractors in hyperchaotic Chua's circuits forming a ring", *Int. J. Bifurc. Chaos*, vol. 13, pp. 2889–2903, 2003.
- [24] Y.X. Li, G.R. Chen, W.K.S. Tang, "Controlling a unified chaotic system to hyperchaotic", *IEEE Trans. Circuits Syst. II*, vol. 52, pp. 204–207, 2005.
- [25] Z.Q. Chen, Y. Yang, G.Y. Qi, Z.Z. Yuan, "A novel hyperchaos system only with one equilibrium", *Phys. Lett. A*, vol. 360, pp. 696–701, 2007.
- [26] T.G. Gao, G.R. Chen, Z.Q. Chen, S.J. Cang, "The generation and circuit implementation of a new hyperchaos based upon Lorenz system", *Phys. Lett. A*, vol. 361, pp. 78–86, 2007.
- [27] G.Y. Qi, M.A. Van Wyk, B.J. Van Wyk, G.R. Chen, "On a new hyperchaotic system", *Phys. Lett. A*, vol. 372, pp. 124–136, 2008.
- [28] J.Z. Wang, Z.Q. Chen, Z.Z. Yuan, "The generation of a hyperchaotic system based on a three-dimensional autonomous chaotic system", *Chin. Phys.*, vol. 15, pp. 1216–1225, 2006.
- [29] L. Zhang, Y.-J.Li, Y.-Q. Xu, "Chaos synchronization of bullwhip effect in a supply chain," *ICMSE '06, International Conference on Management Science and Engineering*, pp. 557–560, 2006.
- [30] K. Giannakopoulos, T.Deliyannis, J. Hadjidemetriou, "Means for Detecting Chaos and Hyperchaos in Nonlinear Electronic Circuits", *DSP*, vol. 2, pp. 951-954, 2002.
- [31] A.B. Özer, E. Akın, " Tools For Detecing Chaos", *SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* vol. 9, no. 1, 2005.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 20.07.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 02.04.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.329934	

Türkiye’de mevcut su ve atıksu yönetim sektörü için tarife ödeme gücü oranlarının karşılaştırılmalı değerlendirilmesi

Hale Özgün^{*1}, Büşra Çiçekalan¹, İzzet Öztürk¹

ÖZ

Ödeme gücü oranı, tüketicilerin su ve atıksu faturasını ödeyebilmek için harcanabilir gelirlerinden ayırdıkları payın önemli bir göstergesidir. Bu kapsamda, Türkiye’de 7 bölgeyi temsil edecek şekilde su ve atıksu yönetim sektörü için 14 büyükşehir ve 7 şehir olmak üzere toplam 21 il seçilmiş, illerin su ve atıksu tarifeleri, birim su tüketimi miktarları, hanhalkı büyüklükleri, sayaç ve okuma bedelleri ile medyan eşdeğer harcanabilir hanhalkı gelirleri incelenerek ödeme gücü oranı hesaplanmasına yönelik metodoloji geliştirilmiştir. Elde edilen veriler; bölgesel olarak büyükşehirler ve diğer şehirler olmak üzere farklı kurumlar açısından karşılaştırılmalı olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde; 21 il için ödeme gücü oranlarının (AR) %0.61 ile %2.78 aralığında değiştiği görülmekte olup, bu oran Türkiye genelinde %1.82 olarak hesaplanmıştır. Düşük gelirli tüketici grubunun ödeme gücü oranı (AR_p) ise %1.42 ile %4.88 aralığında değişmektedir. Türkiye geneli için bu değer %4.33 olarak hesaplanmıştır. Ortalama AR_p açısından bölgesel olarak değerlendirildiğinde; en yüksek ve en düşük değerlerin sırasıyla %4.20 ile Doğu Anadolu Bölgesi ve %2.35 ile Karadeniz Bölgesi olduğu görülmektedir. Büyükşehirlerde ise ortalama AR ve AR_p değerleri, sırasıyla %1.75 ve %3.40 iken, şehirlerde %1.31 ve %2.5’tir. Bölgesel ve büyükşehir/şehirler için elde edilen sonuçlar incelendiğinde; bölgesel farklılıkların kurumsal yapıdaki farklılığa göre ödeme gücü oranları üzerinde daha büyük oranlarda değişime neden olduğu görülmektedir. Ödeme gücü oranının yüksek olduğu illerde, düşük gelirli tüketici gruplarına kurumlar tarafından mali destek sağlanması, su ve atıksu faturalarında indirim, ücretsiz su temini veya blok tarife uygulamaları gibi ekonomik araçların uygulanması düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: En düşük %20’lik gelir dilimi için tarife yükü, su ve atıksu tarifeleri, medyan eşdeğer harcanabilir hanhalkı geliri, ödeme gücü oranı

A comparative evaluation of tariff affordability ratio for water and wastewater management sector in Turkey

ABSTRACT

Affordability ratio is a significant indicator of share from consumers' disposable income for water and wastewater bills. Within this concept, 21 provinces including 14 metropolises and 7 cities, that represent seven regions in Turkey, were selected for water and wastewater management sector and methodology was developed in order to calculate affordability ratio by investigating water and wastewater tariffs, water consumption amounts, households sizes, water meter and meter reading price and median equivalent disposable household income of provinces. The data were comparatively evaluated in terms of different utilities including regional metropolises and other cities. According to the results, affordability ratio (AR)

¹ İstanbul Tekn,k Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, ozgunha@itu.edu.tr

was found to vary between 0.61% and 2.78% for 21 provinces. For Turkey, it was 1.82%. Affordability ratio for low income consumer group (ARp) varied between 1.42% and 4.88%, which was calculated as 4.33% for Turkey. According to the regional results of ARp, the highest and the lowest values were observed in Eastern Anatolia Region with 4.20% and Black Sea Region with 2.35%, respectively. Average AR and ARp were found to be 1.75% and 3.40% in metropolises, while they were 1.31% and 2.50% in cities, respectively. According to the results, it was observed that regional differences caused higher variations in affordability ratio in comparison to differences in the institutional structures. For provinces with high affordability ratio, economic tools such as subsidizing, discount on water and wastewater bills, free water supply and block tariff may be applied by utilities for low income consumer group.

Keywords: tariff burden for the lowest %20 income group, water and wastewater tariffs, median equivalent disposable household income, affordability ratio

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

1980’li yıllarda özellikle büyükşehirlerde artan nüfus, mevcut su kaynaklarının tükenmesine, akabinde su kıtlığı ve ciddi kanalizasyon sorunlarına yol açmıştır. Su kıtlığı ve kanalizasyon sorunlarına pragmatik bir karşılık olarak Türkiye, 1981 yılında büyükşehirlerde yeni bir hizmet temini modelini uygulamaya koymuştur. Belediyeye bağlı ancak bağımsız bütçeli özel kamu kuruluşları olan su ve kanalizasyon idareleri kurulmaya başlanmış, bu idareler kendi bölgelerindeki su temini ve atıksu uzaklaştırma-arıtma hizmetlerinden sorumlu olmuştur. Türkiye’de mevcut durumda büyükşehirlerde 30 adet su ve kanalizasyon idaresi bulunmakta olup, büyükşehirler dışında diğer illerde, il belediyeleri kendi bölgelerindeki su temini ve atıksu uzaklaştırma-arıtma hizmetlerinden sorumludur [1].

Su ve kanalizasyon idareleri ve belediyelerin en temel yükümlülüklerinden biri; su ve atıksu hizmetleri ile ilgili tarifeleri belirlemektir. Tarifeler, ekonomik ve finansal performansın en temel ölçütlerinden biri olup; uygun yöntemlerle belirlenmeleri, idarelerin etkinliği açısından da oldukça önem taşımaktadır. İdareler kaliteyi artırmaya çalışırken aynı zamanda su ve atıksu hizmetleri ile ilgili maliyetleri azaltma eğiliminde oldukları için bu aşamada pek çok zorlukla karşı karşıya kalmaktadırlar. Bu açıdan bakıldığında; tarifeler kurumları memnun etmemekte, abonelere ise çok yüksek gelmektedir [2].

Tarifelerin, idarelerin finansal etkinliğini artıracak şekilde uygun mertebelerde seçilmesi için dikkate alınması gereken en temel faktörler hanehalkı gelirleri ve buna bağlı olarak belirlenen ödeme gücü oranlarıdır. Ödeme gücü oranı; bireysel müşterilerin diğer önemli maliyetleri ödeyebilme

yeteneği devam ediyor iken, temel ihtiyaçları arasında yer alan su ve atıksu hizmetleri için ödeme yapabilme yeteneği olarak ifade edilmekte olup [3], hanehalkı su ve atıksu maliyetlerinin harcanabilir hanehalkı gelirine oranı olarak hesaplanmaktadır. Ödeme gücü oranını etkileyen unsurlar; genellikle hanehalkı harcanabilir geliri ile ölçülen tüketicinin finansal kaynakları, su ve atıksu hizmetleri kapsamında temel ihtiyaçlar arasında yer alan su kullanımı ve atıksu oluşumu (L/kişi.gün), su ve atıksu hizmet bedelleri ve barınma, gıda, sağlık, enerji ve vergiler gibi diğer temel veya kaçınılmaz maliyetlerdir. Bu maliyetler, zamanla kamu hizmetleri genelinde ve müşteriye göre değişiklik gösterebilir. Ödeme gücü oranının hesabında iki farklı yaklaşım uygulanmaktadır. İlk yaklaşım, ilgili kurum tarafından belirlenen yoksulluk sınır değeri kullanılarak temel su ve atıksu hizmet bedelini yoksulluk düzeyindeki gelirin yüzdesi olarak belirlemektir. Diğer bir yaklaşım ise, asgari ücrette çalışan tüketicilerin temel su ve atıksu faturasını ödeyebilmesi için kaç saat çalışması gerektiğinden yola çıkarak hesaplama yapmaktır [3].

Su ve atıksu faturalarının medyan hanehalkı geliri (MHG)’nin ortalama %2 ile 2.5’i arasında olması, tesisin finansal sürdürülebilirliği için oldukça önemlidir. Referans [3], hanehalkı başına atıksu maliyetini; medyan harcanabilir hanehalkı gelirinin %1’inden az ise düşük, %1’i ile %2’si arasında ise orta, %2’sinden fazla ise yüksek fatura yükü olarak tanımlamaktadır.

Düşük gelire sahip nüfus, gelirlerinin önemli bir bölümünü su ve atıksu hizmetleri için harcamaktadır. Yeni Zelanda Manukau Şehri’nde yüksek ve düşük gelirli ailelerin su ve atıksu ödeme gücü oranının değerlendirilmesi amacıyla gerçekleştirilen çalışmada; 2001 yılı için yüksek gelirli grupta elde edilen %0.54 oranı, düşük gelirli grup için %3.24 olarak belirlenmiş, bu oran 2006 yılında yüksek gelirli grup için %0.68’e, düşük

gelirli grup için ise %4.11’e yükselmiştir. Düşük gelirli grup için ödeme gücü oranındaki artışın bu şekilde devam etmesi, daha sonraki yıllarda düşük gelirli grubun, gelirinin %5’inden fazlasını su ve atıksu hizmetlerini ödemek için harcayacağını göstermektedir. Bu durum, en düşük gelir grubunun sürekli finansal stres altında olacağı anlamına gelmektedir [4]. Bu grubun hizmet bedelini ödeyememesi durumunda, fatura ödeme gecikmeleri ve hizmet kesintileri artacaktır. Bu durumda kamu yönetimi devreye girmeli ve müşterilere finansal destek sağlanmalıdır. Şili’de, gelirinin yaklaşık %5’inden fazlasını su ve atıksu hizmeti için harcayan düşük gelir grubundaki tüketicilerin su faturalarına indirim uygulaması yapılmaktadır [5]. Düşük gelirli tüketicileri korumak için en yaygın diğer bir araç ise belirli bir eşige kadar olan su ve atıksu hizmetlerinin düşük veya ücretsiz olarak sağlandığı blok tarife uygulamalarıdır [6]. Referans [3]’e göre, açlık sınırı, yoksulluk sınırı gibi kriterlere göre belirlenen geçim sıkıntısı olan tüketiciler için ücretsiz su ve atıksu hizmeti sağlanması amacıyla tasarlanan “Lifeline Rate” olarak adlandırılan tarife sisteminin dışında, sabit ücretleri asgari ücrete indirme, düşük hacim düşük ücretlendirme ve hanehalkı büyüklüğüne göre ücretlendirme tasarımları da diğer uygulanan yöntemler arasında yer almaktadır.

Ödeme gücü oranı ile ilgili literatürde yer alan değerler Tablo 1’de özetlenmektedir.

Tablo 1. Literatür’de yer alan ödeme gücü oranları (Affordability ratios in the literature)

Açıklama	Ödeme Gücü Oranı	Kaynaklar
Yüksek ve Düşük Gelirli Tüketici Gruplarının Su ve Atıksu Ödeme Gücü Oranları (Yeni Zelanda-Manukau)	%0.54; %3.24 (2001) %0.68; %4.11 (2006)	[4]
Ortalama Ödeme Gücü Oranı	%1-2	[7]
Kırsal Kesimlerdeki Su Hizmetleri için Ödeme Gücü Oranı (Kamboçya, Etiyopya, Bangladeş)	%1.5-2	[8]
Su ve Atıksu Ödeme Gücü Oranı	%2.5-3	[9]
Düşük Gelirli Tüketici Grubu için Ödeme Gücü Oranı	≤%5	[10]
ERSAR*, IWA**, UNDP*** ve OECD****	%3	[10]
Dünya Bankası	%3-5	[10]
Gelişmiş Ülkelerde Düşük Gelirli Tüketici Gruplarının Ödeme Gücü Oranı	%2.5-3.5	[11]

*ERSAR: Portekiz- Su ve Atık Hizmetleri Düzenleme Kurulu

**IWA: Uluslararası Su Derneği

***UNDP: Birleşmiş Milletler Kalkınma Programı

****OECD: Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü

Referans [12]’de, Tuna Nehri Ülkeleri’ndeki atıksu arıtma maliyetleri karşılaştırılmış, atıksu arıtma maliyetlerinin ortalama kişi başı yıllık gelire oranı, düşük gelire sahip Macaristan, Bulgaristan ve Romanya için sırasıyla yaklaşık %3.7, % 1.9 ve %1.8, Türkiye için ise yaklaşık %1.6 olarak belirlenmiştir. Referans [9]’de ise, su temini ve atıksu uzaklaştırma-arıtma maliyetlerinin harcanabilir hanehalkı gelirinin %2.5’i ile 3’ü aralığında değiştiği ve Türkiye için bu değer yaklaşık olarak %1.7 olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmalarda yer alan tahminler dışında, Türkiye genelinde mevcut durumda su ve atıksu sektöründe ödeme gücü oranlarının belirlenmesi ve analiz edilmesi ile ilgili gerçekleştirilmiş herhangi bir çalışma mevcut değildir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye’nin büyükşehir ve büyükşehir olmayan illerini yansıtabilecek şekilde yedi farklı bölgesinde 21 ili inceleyerek, bu illerdeki orta ve düşük gelirli hanehalkı için su ve atıksu ödeme gücü oranlarını belirlemektir. Çalışmada; orta ve düşük gelirli hanehalkı için ödeme gücü oranları, büyükşehir/şehir olmak üzere farklı yönetim kurumları açısından ve bölgesel olarak karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu sayede idareler ve belediyeler tarifelerini mevcut durumda benzer özellikleri taşıyan diğer kurumlardaki tarifeler ile karşılaştıracak ve ortalamanın üzerindeki tarifeleri için gerekli düzeltici tedbirleri alabilecekleri temel bilgilere sahip olacaklardır.

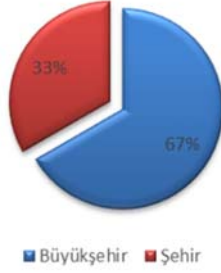
2. METARYAL VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

2.1. İncelenen Kurumlar (Investigated Utilities)

Bu çalışmada su ve atıksu sektörü için ödeme gücü oranlarını belirlemek üzere, Türkiye’nin yedi farklı bölgesini temsil edecek şekilde 21 il seçilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen iller için kullanılacak olan kodlar Tablo 2’de yer almaktadır. Her bir bölgeyi ikisi büyükşehir biri şehir olmak üzere üç il temsil etmekte olup (Şekil 1), seçilen illerin toplam nüfusu, Türkiye nüfusunun yaklaşık %54’üne tekabül etmektedir.

Tablo 2. Seçilen iller için kullanılacak kodlar (Codes for selected provinces)

Akdeniz B.		Doğu Anadolu B.		Ege B.		Güneydoğu Anadolu B.	
B.şehi r	Şehi r	B.şehi r	Şehi r	B.şehi r	Şehi r	B.şehi r	Şehi r
A _{b,1}	A _ş	D _{b,1}	D _ş	E _{b,1}	E _ş	G _{b,1}	G _ş
A _{b,2}		D _{b,2}		E _{b,2}		G _{b,2}	
İç Anadolu B.		Karadeniz B.		Marmara B.			
B.şehir	Şehir	B.şehir	Şehir	B.şehir	Şehir		
I _{b,1}	I _ş	K _{b,1}	K _ş	M _{b,1}	M _ş		
I _{b,2}		K _{b,2}		M _{b,2}			



Şekil 1. Seçilen illerin büyükşehir ve şehir olarak dağılımı (Distribution of selected provinces as a metropolises and cities)

2.2. Çalışma Metodolojisi (Methodology of the Study)

Çalışma kapsamında; medyan eşdeğer harcanabilir hanehalkı geliri (MHHG) ve en düşük %20’lik gelir dilimindeki medyan eşdeğer harcanabilir hanehalkı geliri (MHHGp) için iki farklı ödeme gücü oranı belirlenmiştir. MHHG için hesaplanan ödeme gücü oranı AR, MHHGp için hesaplanan düşük gelirli tüketici grubunun ödeme gücü oranı ise AR_p ile gösterilmektedir. AR; hanehalkı su ve atıksu faturasının MHHG’ye oranlanması ile hesaplanmaktadır. Hanehalkı su ve atıksu faturası; kişi başı su tüketimi (L/gün.kişi), hanehalkı büyüklüğü, su ve atıksu tarifesi, sayaç bedeli ve sayaç okuma bedeli dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan kısaltmalar Tablo 3’te özetlenmektedir.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan kısaltmalar (Abbreviations used in the study)

Kısaltma	Açılımı
MHHG	Medyan Eşdeğer Harcanabilir Hanehalkı Geliri
MHHGp	En Düşük %20’lik Gelir Dilimindeki Medyan Eşdeğer Harcanabilir Hanehalkı Geliri
MHHFG	Medyan Eşdeğer Harcanabilir Hanehalkı Fert Geliri
MHHFGp	En Düşük %20’lik Gelir Dilimindeki Medyan Eşdeğer Harcanabilir Hanehalkı Fert Geliri
AR	Ödeme Gücü Oranı
AR _p	Düşük Gelirli Tüketici Grubunun Ödeme Gücü Oranı
P	Su ve Atıksu Tarifesini

Y	Kişi Başına Su Tüketimi
HB	Hanehalkı Büyüklüğü
SB	Sayaç ve Sayaç Okuma Bedeli
G	Medyan Eşdeğer Harcanabilir Hanehalkı Fert Geliri
Gp	En Düşük %20’lik Gelir Dilimindeki Medyan Eşdeğer Harcanabilir Hanehalkı Fert Geliri
GSYH	Gayri Safi Yurtiçi Hasıla

$$AR = \frac{((P^{l*}Y*HB)+SB)*100}{G^{l*}HB} \quad (1)$$

1 : Blok tarife uygulanan iller için ağırlıklı ortalama ile hesaplanan tarife değeri kullanılmıştır

11: Bölgesel medyan eşdeğer harcanabilir hanehalkı fert geliri (MHHFG) verilen iller için il bazlı çalışmayı sürdürebilmek amacıyla, ilin yer aldığı bölgesel MHHFG bölgenin brüt kazanç değerine oranlanmış ve o ile ait kişi başı gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH) ile çarpılarak ilin MHHFG’si hesaplanmıştır.

$$AR_p = \frac{((P^{l*}Y*HB)+SB)*100}{G_p^{l*}HB} \quad (2)$$

111 : Blok tarife uygulanan iller için 1. tarife değeri kullanılmıştır

1111 : Bölgesel olarak verilen “Eşdeğer hanehalkı kullanılabilir fert gelirine göre sıralı yüzde 20’lik gruplar itibarıyla yıllık eşdeğer hanehalkı kullanılabilir fert gelirinin dağılımı” verisinde tüm bölgelerin MHHFGp ile MHHFG değerleri arasındaki oranlar kullanılarak hesaplama yapılmıştır.

- P : Su ve atıksu tarifesini, TL/m³
Y : Kişi başına su tüketimi, m³/kişi.y
HB : Hanehalkı büyüklüğü, kişi
SB : Sayaç ve sayaç okuma bedeli, TL/ay
G : Medyan eşdeğer harcanabilir hanehalkı fert geliri (MHHFG), TL/kişi.y
Gp : En düşük %20’lik gelir dilimindeki medyan eşdeğer harcanabilir hanehalkı fert geliri (MHHFGp), TL/kişi.y

Blok tarife uygulaması olan bazı illerde su ve atıksu tarifesini, tüketilen su miktarına bağlı olarak kademeli olarak belirlenmektedir. Çalışma kapsamında AR hesaplanırken, blok tarife uygulanan illerde P değeri için ağırlıklı ortalama yaklaşımı kullanılarak tek bir tarife değeri kullanılmıştır. AR_p hesabında ise, P değeri için birinci tarife (su tüketim miktar aralığı 0-10 m³ için verilen değer) değeri kullanılmıştır.

Değerlendirilecek illere ait kişi başına su tüketimi, hanehalkı büyüklükleri, kişi başına gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH), MHHFG’ye göre sıralı %20’lik gruplar itibarıyla yıllık eşdeğer harcanabilir

hanehalkı fert gelirinin dağılımları ve bölgesel brüt kazanç verileri Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK)’ndan temin edilmiştir [13]. Kişi başı su tüketimi ve hanehalkı büyüklüğü verileri su ve atıksu faturasını hesaplamak için kullanılırken, diğer veriler MHHFG ve MHHFGp değerlerini hesaplamak için kullanılmıştır.

TÜİK’te “Eşdeğer hanehalkı kullanılabilir fert gelirine göre sıralı yüzde 20’lik gruplar itibarıyla yıllık eşdeğer hanehalkı kullanılabilir fert gelirinin dağılımı”, bölgesel (Düzyey 2) olarak verilmektedir [13]. Analiz edilen 21 ilden üçü için TÜİK’te MHHFG mevcut olup, diğer iller için bu değer bölgesel olarak verilmektedir. Bu nedenle, MHHFG’si bölgesel olarak verilen iller için il bazlı çalışmayı sürdürebilmek amacıyla, ilin yer aldığı bölgesel MHHFG bölgenin brüt kazanç değerine oranlanmış ve o ile ait harcanabilir hanehalkı gelir oranı hesaplanmıştır. Bu değer il bazlı GSYH ile çarpılarak analiz edilmek istenen ilin MHHFG’si hesaplanmıştır.

ARp hesabında gerekli olan MHHFGp değerini hesaplamak için TÜİK’te bölgesel olarak verilen “Eşdeğer hanehalkı kullanılabilir fert gelirine göre sıralı yüzde 20’lik gruplar itibarıyla yıllık eşdeğer hanehalkı kullanılabilir fert gelirinin dağılımı” verisinde tüm bölgelerin MHHFGp değerleri, MHHFG değeri ile oranlanarak en düşük %20’lik gelir dilimindeki tüketici grubu gelirlerinin medyan eşdeğer hanehalkı gelirlerinin ne kadarını temsil ettiği bulunmuştur. Türkiye ortalaması için yapılan hesaplamada, bu oran %42 bulunmuştur. Yapılan çalışmada, bölgesel hassasiyeti dikkate almak amacıyla Türkiye ortalaması yerine bölgesel olarak hesaplanan oranlar kullanılmıştır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Elde Edilen Bulgular (Obtained Results)

Ödeme gücü oranı analizinde kullanılmak üzere farklı iller için hesaplanan MHHFG ve MHHFGp değerleri Tablo 4’te verilmektedir. İllerin MHHFG ve MHHFGp değerlerinin ortalamaları sırasıyla 13047 TL/yıl ve 6301 TL/yıl’dır. Hesaplamalara göre; MHHFG ve MHHFGp en düşük olan il sırasıyla 3823 TL/yıl ve 1800 TL/yıl değerleri ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi’nde yer almakta olan G_{b,2}’dir. Bu değerlerin en yüksek olduğu il ise 24218 TL/yıl ve 12851 TL/yıl değerleri ile Marmara Bölgesinde yer alan M_{b,2}’dir.

Tablo 4. İller için hesaplanan MHHFG ve MHHFGp değerleri (Calculated MHHFG and MHHFGp values for provinces)

İl Kodu	Bölgesel MHHG/ Bölgesel Brüt Kazanç	GSYH (TL/yıl.kişi)	MHHFG (TL/yıl.kişi)	Bölgesel MH HG p/ Bölgesel MH HG	MH HFG p (TL/yıl.kişi)
A _{b,1}	0.80	29693	23630	0.43	10173
A _{b,2}	0.57	19381	11072	0.47	5177
A _s	0.80	20975	16693	0.43	7187
D _{b,1}	0.64	15442	9888	0.43	4270
D _{b,2}	0.61	15207	9219	0.45	4179
D _s	0.61	16946	10274	0.45	4657
E _{b,1}	-	-	12920	-	5810
E _{b,2}	0.72	19121	13762	0.52	7168
E _s	0.62	21916	13553	0.54	7380
G _{b,1}	0.39	12800	5006	0.47	2358
G _{b,2}	0.39	9773	3823	0.47	1800
G _s	0.40	12232	4881	0.54	2641
I _{b,1}	-	-	15000	-	7236
I _{b,2}	0.53	20981	11139	0.47	5203
I _s	0.61	17491	10654	0.53	5674
K _{b,1}	0.85	14575	12388	0.48	5949
K _{b,2}	0.85	22073	18760	0.48	9010
K _s	0.56	30673	17069	0.53	9057
M _{b,1}	-	-	14609	-	7152
M _{b,2}	0.56	43521	24218	0.53	12851
M _s	0.58	26634	15428	0.48	7391
	Ortalama		13047		6301

21 il için hesaplanan AR ve ARp değerleri Tablo 5’te verilmektedir. Türkiye geneli için gerçekleştirilen hesaplamalara göre AR %1.82, ARp ise %4.33 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde; 21 il için AR değerinin %0.61 ile %2.78, ARp değerinin ise %1.42 ile %4.88 aralığında değiştiği görülmektedir. En yüksek AR değerine sahip il %2.78 değeri E_{b,1}’dir. E_{b,1}, E_{b,2} ve G_{b,2} illeri dışındaki illerde AR değerinin %2’nin altında olduğu görülmektedir. İncelenen illerin AR değerlerinin %2’nin altında olması finansal sürdürülebilirlik açısından olumlu bir gösterge olarak tanımlanabilir [5]. En düşük AR ve ARp değerine sahip iller ise sırasıyla %0.61 ve %1.42 değerleriyle A_s’dir. ARp değerleri il bazında incelendiğinde; en yüksek değerlerin elde edildiği illerin sırasıyla G_{b,2} (%4.88), D_{b,1} (%4.49), E_{b,1} (%4.38) ve D_{b,2} (%4.35) olduğu görülmektedir. ARp değerinin yüksek olduğu illerde, ilerleyen dönemlerde tüketicilerin su ve atıksu hizmetlerinin bedelini ödeyebilmelerinin zorlaşması muhtemeldir. Ödeme gücü oranının, harcanabilir gelirin %5’inden fazla olması, tüketicilerin su ve atıksu faturalarını ödemekte zorlanmalarının yanı sıra kurumların fatura tahsilatlarında da sorun yaşamalarına neden olabilir.

3.2. Bulguların Mukayeseli Analizi (Comparative Evaluation of the Results)

Sonuçlar bölgesel olarak incelendiğinde; MHHG’si Türkiye’den yüksek olan Ege Bölgesi’nde ortalama AR’nin en yüksek (%2.04) olması, özellikle Ege Bölgesi’nde büyükşehirlerde uygulanan su ve atıksu tarifelerinin oldukça yüksek olması ile ilişkilendirilebilir. Ortalama AR değerinin en düşük (%1.10) olduğu bölge ise Akdeniz Bölgesi’dir. 7 bölgenin ortalama AR değerleri incelendiğinde; Ege Bölgesi dışında diğer tüm bölgelerin orta fatura yüküne sahip olduğu söylenebilir [3]. ARp açısından değerlendirme yapıldığında; en düşük ortalama ARp değeri %2.35 ile Karadeniz Bölgesi’nde elde edilmiştir. Ortalama olarak en yüksek değerlerin gözlendiği ilk üç bölge ise sırasıyla; Doğu Anadolu (%4.20), Güneydoğu Anadolu (%3.52) ve Marmara Bölgesi (%3.31)’dir (Şekil 2). Dolayısıyla Doğu Anadolu, Güneydoğu Anadolu ve Marmara Bölgeleri’nde özellikle büyükşehirlerde kamu yönetimlerinin tüketiciye mali destek sağlaması gerekmektedir. Ayrıca, düşük gelir grubu için blok tarifenin ilk tarife değeri üzerinden ücretlendirme yapılabilir. Türkiye için, asgari ücretle çalışan tek kişinin gelirin e bağlı aboneler için $36.5 \text{ m}^3/\text{yıl}$ ($\sim 3 \text{ m}^3/\text{ay}$) ücretsiz su temin edilebilir ($100 \text{ lt/hane-gün} * 365 \text{ gün}$). Bu durumda 10 m^3 ’te %33’ü ücretsiz temin edilebilir. Bir başka yol ise, ilgili su ve atıksu idaresi tarafından %33 su tasarrufu sağlayacak şekilde armatür/WC aparatı dağıtılması ve bu şekilde su tasarrufu yapılarak fatura yükünün azaltılmasıdır.

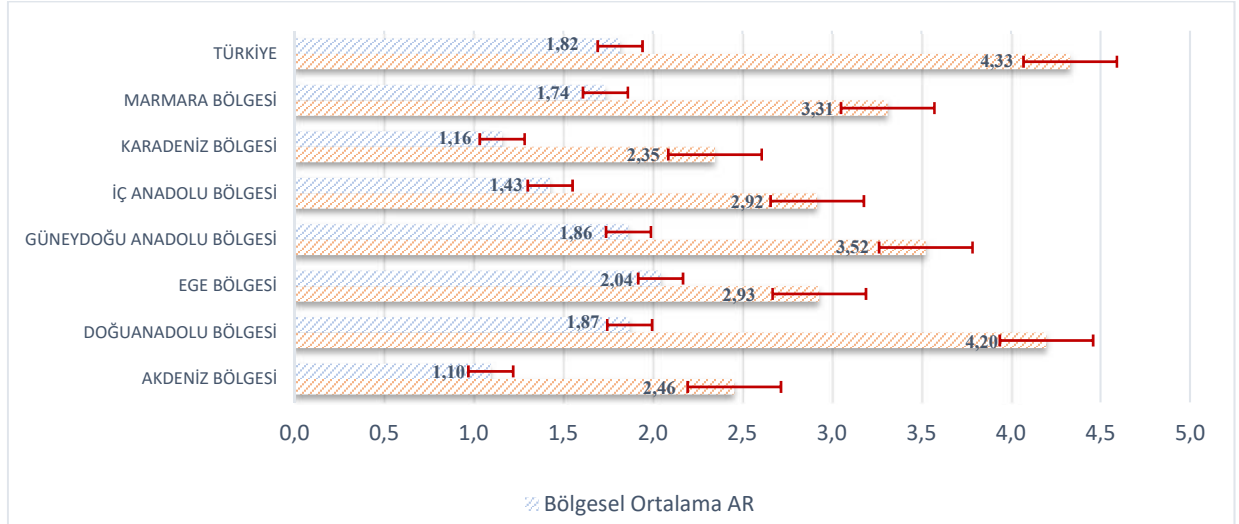
7 bölgenin AR ve ARp değerleri karşılaştırıldığında; özellikle Doğu Anadolu Bölgesi’nde, AR (%1.87) ve ARp (%4.20) değerleri arasında büyük fark olması, yüzd elik gelir dilimindeki harcanabilir hane halkı gelir dağılımının eşitsizliğini göstermektedir. Ortalama değerler incelendiğinde; su ve atıksu hizmet bedelini ödemekte en çok zorlanan düşük gelirli tüketici grubu Doğu Anadolu Bölgesi’ndedir. İlerleyen yıllarda ARp değerinde artış olursa, bu grubun su ve atıksu hizmetleri bedelini ödeyebilmesi zorlaşabilir. Şekil 2 incelendiğinde; AR (%2.04) ve ARp (%2.92) değerleri arasındaki farkın en düşük olduğu bölgenin ise Ege Bölgesi olduğu görülmektedir. Bu da Ege Bölgesi’nde yüzd elik gelir dilimindeki harcanabilir hane halkı gelir dağılımının homojen olduğunun bir göstergesidir.

H. Özgün ve di . /Türkiye’de mevcut su ve atıksu yönetim sektörü için tarife ödeme gücü oranlarının kar ıla tırılmalı de erlendirilmesi

Tablo 5. İller için ödeme gücü oranı analizi sonuçları (Results of affordability ratio analysis for provinces)

		<i>Su ve Atıksu Tarifesi (KDV Hariç)</i>	<i>MHHFG</i>	<i>MHHFGp</i>	<i>Hanehalkı Büyüklüğü</i>	<i>Kişi Başı Su Tüketimi</i>	<i>Aylık Su Tüketimi</i>	<i>Sayaç Bedeli</i>	<i>Su ve Atıksu Tarifesi (KDV Dahil)</i>	<i>Su ve Atıksu Faturası</i>	<i>MHHG</i>	<i>MHHGp</i>	<i>AR</i>	<i>ARp</i>
		<i>TL/m³</i>	<i>TL/yıl.kişi</i>	<i>TL/yıl.kişi</i>	<i>kişi</i>	<i>L/gün.kişi</i>	<i>m³/ay.kişi</i>	<i>TL/ay</i>	<i>TL/m³</i>	<i>TL/ay</i>	<i>TL/ay</i>	<i>TL/ay</i>		
AKDENİZ BÖLGESİ	<i>Ab,1</i>	2.49	23630	10173	3.34	280	28	5.08	2.69	80.5	6577	2832	1.22	2.84
	<i>Ab,2</i>	1.82	11072	5177	3.90	200	24	5.08	1.97	52.1	3599	1682	1.45	3.10
	<i>Aş</i>	0.99	16693	7187	3.05	214	20	5.08	1.07	26.0	4243	1827	0.61	1.42
DOĞU ANADOLU BÖLGESİ	<i>Db,1</i>	1.81	9888	4270	4.20	252	32	5.08	1.95	67.1	3461	1495	1.94	4.49
	<i>Db,2</i>	2.98	9219	4179	3.80	143	16	5.08	3.22	57.5	2919	1323	1.97	4.35
	<i>Dş</i>	1.99	10274	4657	3.74	205	23	5.08	2.15	54.5	3202	1451	1.70	3.76
EGE BÖLGESİ	<i>Eb,1</i>	4.86	12920	5810	3.14	180	17	5.08	5.25	93.9	3381	1520	2.78	4.38*
	<i>Eb,2</i>	3.10	13762	7168	3.04	257	23	5.08	3.35	83.6	3486	1816	2.40	2.65*
	<i>Eş</i>	1.60	13553	7380	3.12	177	17	5.08	1.73	33.7	3524	1919	0.96	1.76
GÜNEY DOĞU ANADOLU BÖLGESİ	<i>Gb,1</i>	1.29	5006	2358	5.49	125	21	5.08	1.39	33.7	2435	1147	1.47	3.13
	<i>Gb,2</i>	1.16	3823	1800	6.10	172	31	5.08	1.26	44.6	2706	1274	2.30	4.88
	<i>Gş</i>	1.06	4881	2641	6.00	192	35	5.08	1.14	44.5	2441	1321	1.82	2.57*
İÇ ANADOLU BÖLGESİ	<i>Ib,1</i>	2.57	15000	7236	3.20	211	20	5.08	2.77	61.2	4000	1930	1.53	3.17
	<i>Ib,2</i>	2.57	11139	5203	3.58	160	17	5.08	2.78	52.8	3323	1552	1.59	3.40
	<i>Iş</i>	1.50	10654	5674	3.49	182	19	5.08	1.62	36.0	3099	1650	1.16	2.18
KARADENİZ BÖLGESİ	<i>Kb,1</i>	1.75	12388	5949	3.23	250	24	5.08	1.89	50.9	3334	1601	1.53	3.18
	<i>Kb,2</i>	1.53	18760	9010	3.37	268	27	5.08	1.66	49.9	5269	2530	0.95	1.97
	<i>Kş</i>	2.15	17069	9057	3.25	182	18	5.08	2.33	46.4	4623	2453	1.00	1.89
MARMARA BÖLGESİ	<i>Mb,1</i>	3.90	14609	7152	3.50	181	19	5.08	4.21	84.9	4261	2086	1.99	3.99*
	<i>Mb,2</i>	3.34	24218	12851	3.6	237	26	5.08	3.60	97.6	7286	3866	1.34	2.03*
	<i>Mş</i>	3.70	15428	7391	2.78	186	16	5.08	3.99	67.0	3574	1712	1.88	3.91
Türkiye	<i>TR</i>	2.30	11108	4661	3.60	200	22	5.08	2.57	60.6	3332	1398	1.82	4.33

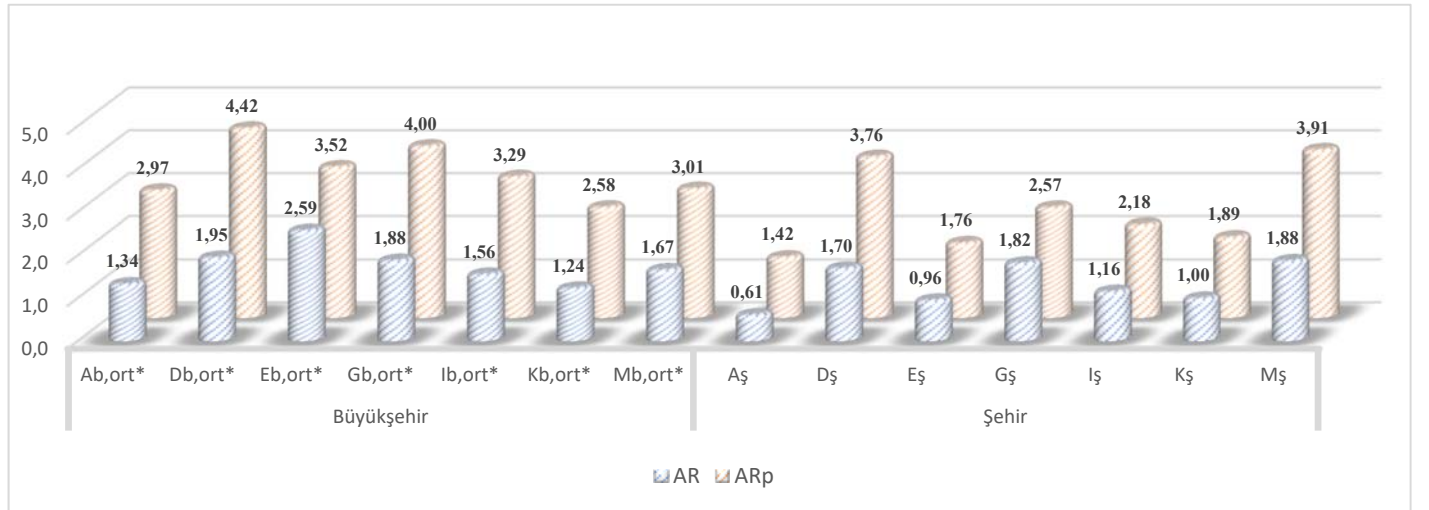
*Blok tarife uygulanan illerde, AR değeri hesabında ağırlıklı ortalama tarife değeri, ARp değeri hesabında ise 1. Tarife değeri kullanılmıştır



Şekil 2. Bölgesel ortalama AR ve ARp değerleri (Regional average AR and ARp values)

Büyükşehir ve şehirlerin ortalama AR ve ARp değerleri incelendiğinde; bu oranın büyükşehirlerde daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 3). AR değerinin en yüksek olduğu büyükşehir Eb,1 (%2.78) iken, şehir ise Mş (%1.88)’dir. 21 il içerisinde yer alan 14 büyükşehirin ortalama AR ve ARp değerleri sırasıyla %1.75 ve %3.40 olarak hesaplanmıştır. Geri kalan 7 şehir için ortalama AR değeri %1.31, ARp değeri ise % 2.5’dir. Büyükşehirlerin çoğunluğunda su ve atıksu faturası yüksek olup, bu şehirlerde tüketicilerin su ve atıksu hizmet bedelini

ödemek için harcanabilir hanehalkı gelirinden ayırdıkları pay daha yüksek olmaktadır. Şehirlerdeki ARp ile karşılaştırıldığında; tüm bölgeler için büyükşehirlerde düşük gelirli tüketici gruplarının daha yüksek fatura yüküne sahip olduğu görülmektedir (Şekil 3). Ortalama değerler incelendiğinde; AR ve ARp değerlerinin büyükşehirlerde şehirlere göre yaklaşık %35 oranında fazla olduğu görülmektedir. Bu oranlar en düşük ve en yüksek ortalama değerlerin elde edildiği bölgeler için %85 seviyelerindedir.



Şekil 3. Büyükşehir ve şehirler için ortalama AR ve ARp değerleri (Average AR and ARp values for metropolises and cities)

Mb,ort*: Marmara Bölgesindeki büyükşehirlerin ortalama AR ve ARp değerleri
 Kb,ort*: Karadeniz Bölgesindeki büyükşehirlerin ortalama AR ve ARp değerleri
 Ib,ort*: İç Anadolu Bölgesindeki büyükşehirlerin ortalama AR ve ARp değerleri
 Eb,ort*:Ege Bölgesindeki büyükşehirlerin ortalama AR ve ARp değerleri
 Gb,ort*: Güneydoğu Anadolu Bölgesindeki büyükşehirlerin ortalama AR ve ARp değerleri
 Db,ort*: Doğu Anadolu Bölgesindeki büyükşehirlerin ortalama AR ve ARp değerleri
 Ab,ort*: Akdeniz Bölgesindeki büyükşehirlerin ortalama AR ve ARp değerleri

4. GENEL DEĞERLENDİRME VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Tüketicilerin harcanabilir gelirinden su ve atıksu faturasını ödeyebilmek için ayırdığı pay ödeme gücü oranı olarak ifade edilmekte olup, bu çalışmada Türkiye’de mevcut su ve atıksu sektörü için ödeme gücü oranları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, 21 il için AR’nin %0.61 ile %2.78 aralığında değiştiği görülmektedir. ARp değeri ise %1.42 ile %4.88 arasında değişmektedir.

Türkiye geneli için ise AR %1.82 ve ARp %4.33’tür. Türkiye genelinde büyükşehirler, şehirler ile karşılaştırıldığında; büyükşehirlerin daha yüksek AR (%1.75) ve ARp (%3.40) değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Şehirlerde ise, AR ve ARp sırasıyla %1.31 ve %2.5’tir.

ARp değeri, fatura tahsilatlarında da sorunlara yol açacağı için uygun aralıklarda seçilmesi oldukça önemlidir. Bölgesel ve büyükşehir/şehirler için elde edilen sonuçlar incelendiğinde; bölgesel farklılıkların kurumsal yapıdaki farklılığa göre ödeme gücü oranları üzerinde daha büyük oranlarda değişime neden olduğu görülmektedir. Doğu Anadolu Bölgesi AR ve ARp arasındaki farkın en fazla olduğu bölge olup, Ege Bölgesi’nde ise bu fark oldukça düşük seviyelerdedir.

AR ve ARp değerleri arasındaki farkın yüksek olması, yüzdelik gelir dilimindeki harcanabilir hanehalkı gelir dağılımının eşitsizliğini göstermekte olup, o bölgede/ilde yaşayan düşük gelirli tüketici grubunun su ve atıksu hizmet bedelini ödemekte zorlanacağını önemli bir göstergesidir. Fatura ödemelerinin gecikmesi, hizmet kesintisinin artması gibi hizmet bedelinin ödenememesinden kaynaklanan olumsuzlukların ortadan kaldırılması için bu müşterilere destek sağlanması gerekmektedir. Kurum ve/veya belediyeler tarafından düşük gelirli tüketici grubuna finansal açıdan yardımlar yapılabilir. Finansal yardımlar için, Şili’de [5] uygulanan ödeme gücü oranının %5’in üstünde olması durumunda su faturalarına indirim uygulanması veya blok su tarifesi uygulayan kurum tarafından bu tüketici grubuna 1. tarife değeri uygulanması örnek olarak verilebilir. Ayrıca, Raftelis tarafından önerilen sabit ücretleri asgari ücrete indirme, düşük hacim için düşük ücretlendirme veya

hanehalkı büyüklüğüne göre ücretlendirme gibi farklı tarife tasarımları uygulanabilir [3]. Belirli kriterlere göre belirlenmiş düşük gelirli tüketici grubuna ücretsiz su temini de sağlanabilir. Kurumlar tarafından tedarik edilecek su tasarrufu sağlayan armatürler/WC aparatları sayesinde su tasarrufu yapılarak müşterilerin fatura yükünün azaltılması da alınabilecek en önemli tedbirler arasında yer almaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] GWA0, “Türkiye Cumhuriyeti: Sürdürülebilir Kentsel Su Temini ve Sanitasyonu,” *Rapor No. 110547-TR. Dünya Bankası, Su Ortaklığı Programı, ABD*, 2016.
- [2] A. Danilenko, C. van den Berg, B. Macheve, J. Moffitt, “The IBNET Water Supply and Sanitation Blue Book 2014-The International Benchmarking Network for Water and Sanitation Utilities Databook,” *World Bank Group-Water and Sanitation Program, Washington, ABD*, 2014.
- [3] G.A. Raftelis, “Water and Wastewater Finance and Pricing. The Changing Landscape,” 4. Baskı. Bölüm: 22. CRC Press, Taylor&Francis Group, ABD, 2015.
- [4] B. Mahmood, S.Sharma, “Affordability of household water and wastewater charges in Manukau City: A case study,” *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, cilt. 125, pp. 313-324, 2009.
- [5] H. Smets, “Access to drinking water at an affordable price in developing countries. In: El Moujabber, M., Mandi, L., Trisorio-Liuzzi, G., Martín, I., Rabi, A., Rodríguez, R. (Eds.), *Technological Perspectives for Rational Use of Water Resources in the Mediterranean Region*. Bari: CIHEAM. No.88, pp. 57-68, 2009.
- [6] S. Fankhauser, S. Tepic, “Can poor consumers pay for energy and water? An affordability analysis for transition countries,” No.92. European Bank for Reconstruction and Development, London, UK, 2005.
- [7] A. Janzen, A. Gopal, H.I. D. Mohammed H, H. L. Cooper, “Cost Recovery and

- Affordability in Small Drinking Water Treatment Plants in Alberta, Aaron,” *Journal AWWA*, cilt.108, no. 5, pp. E290-E298. 2015.
- [8] J. Chamberlain, D. Sabatini, “Water-supply options in arsenic-affected regions in Cambodia: Targeting the bottom income quintiles,” *Science of the Total Environment*, cilt. 488-489, pp. 521-531, 2014.
- [9] J.S. Pires, “Consumer tariffs in practice – The Portuguese experience-, OECD expert meeting on “sustainable financing for affordable water services: from theory to practice”,” Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), Paris, Fransa, 2007.
- [10] R. Martins, C. Quintal, L. Cruz, E. Barata, “Water affordability issues in developed countries – The relevance of micro approaches,” *Utilities Policy*, cilt. 43, pp. 117-123, 2016.
- [11] S. Porcher, “Efficiency and Equity in Two-Part Tariffs: The Case of Residential Water Rates”, No. 2012-08. *Chaire EPPP - Economie des partenariats public-privé*, Paris, Fransa, 2012.
- [12] M. Zessner, C. Lampert, H. Kroiss, S. Lindtner, “Cost comparison of wastewater treatment in Danubian countries.” *Water Science & Technology*, cilt. 62, pp. 223-230, 2010.
- [13] TÜİK, Temel İstatistikler. Adres: <http://www.tuik.gov.tr/UstMenu.do?metod=temelist>, 2014

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Geliş/Received</u> 18.11.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 27.03.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.355508	

Radyoaktif jeofizik kuyu logu verileri ve rezerv değerleri arasındaki ilişkinin incelenmesi

Hakan Akgül¹, Eray Yıldırım^{*2}, Hasan Karaaslan³, Can Karavul⁴

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, radyoaktif jeofizik kuyu logu araştırmalarından elde edilen Uranyum, Toryum, Potasyum ve Gamma-Ray verileri ile laboratuvar çalışmaları neticesinde hesaplanan Uranyum rezerv miktarları arasındaki ilişkilerin incelenmesidir. Çalışmada kullanılan veriler Nevşehir ili sınırları içerisinde toplanmış olup, toplam 34 sondaj çalışmasından karot alınarak elde edilmiştir. Bu karot numuneler laboratuvar ortamında incelenerek rezerv miktarının belirlenmesine yönelik fiziksel parametreler elde edilmiştir. Kuyu logu ve laboratuvar verilerine toplamda 38 olmak üzere basit ve çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Regresyon analizleri sonucunda her bir model için belirleme katsayısı (R^2), standart hata miktarları gibi istatistiksel değerler hesaplanmış ve Uranyum değerinin ve rezerv miktarının kestirimine yönelik olarak ampirik bağıntılar önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Uranyum, Jeofizik Kuyu Logu, Spektral Gamma-Ray, Uranyum Rezerv Hesabı, Nadir element

Statistical investigation of the relationship between radioactive geophysical well-log datas and reserve values

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the relationship between the uranium reserve amounts of the laboratory results and Uranium, Thorium, Potassium and Gamma-Ray datas from the geophysical well logs. The data used in the study were collected in the Nevşehir province and obtained by taking cores from 34 drilling works. From the examination of these core samples, the physical parameters for determining the amount of the reserve were obtained. In total, 38 simple and multiple regression analyses were performed with the data of well logs and laboratory. With the regression analyses, the statistical values such as coefficient of determination (R^2), standard error were calculated for each model and the empirical equations were suggested for the estimation of the uranium value and the amount of the reserve.

Keywords: Uranium, Geophysical Well Logs, Spectral Gamma-Ray, Uranium Reserve Calculation, Rare Elements

* Corresponding Author

¹ Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, hknkgl_06@hotmail.com

² Bursa Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, eray.yildirim@btu.edu.tr

^{3,4} Sakarya Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, hkaraaslan@sakarya.edu.tr, karavul@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde enerjiye bağımlılığımız her geçen gün giderek artmakta ve enerji hammaddelerindeki çeşitlilikler ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda enerji hammadde arama yöntemleri günden güne gelişmektedir. Bu yöntemlerden biri olan sondaj kuyusundan alınan jeofizik log araştırmalarının oldukça yüksek tahmin gücüne sahip olması yöntemin geçerliliğini ve uygulama yoğunluğunu arttırmakta ve hammadde aramalarında ön plana çıkartmaktadır. Türkiye’de Uranyum aramaları MTA (Maden Tetkik Arama) tarafından aktif olarak başlatılmış olup, günümüzde de halen devam etmektedir. Özellikle son yıllarda bu aramalar ülkenin enerji ihtiyacından dolayı büyük bir hız kazanmıştır. Yapılması düşünülen nükleer santrallere hammadde sağlamak için başta MTA Genel Müdürlüğü olmak üzere sektörde arama çalışmaları genişletilmiştir.

Uranyum aramaları, oldukça detaylı olarak planlanmakta ve arama çalışmalarında başlıca havadan-karadan prospeksiyon, detaylı jeoloji, sondaj ve akabinde kuyu logu çalışmaları kullanılmaktadır. Türkiye de en önemli Uranyum hammadde yatakları Manisa, Uşak, Yozgat, Çanakkale, Giresun, Aydın, Rize ve Nevşehir illerinde bulunmaktadır. Türkiye’de uranyum aramaları oldukça eski zamanlara dayanmakta olup bu çalışmalara Kaplan 1945 yılında Uşak Eşme bölgesi ve Zeschke 1953 yılında Niğde Bolkardağ mevkiinde yapılan çalışmaları örnek olarak gösterebiliriz [1] [2]. Nevşehir ve çevresinde, Yasak 1958 yılında Orta Anadolu’da havadan radyoaktif mineral arama [3], Çetintürk 1961 yılında Arafa-Göynük-Alacaşar (Nevşehir) bölgelerinde radyoaktif mineral arama [4] ve Uçakcıoğlu 1987 yılında Nevşehir-Gülşehir civarında radyoaktif mineral arama [5] çalışmaları neticesinde muhtemel radyoaktif mineral sahaları tespit etmişlerdir.

Dünya’da gerçekleştirilen uranyum aramalarının birçoğunda jeofizik yöntemler birlikte kullanılarak sonuca gidilse de bu çalışmaların çoğunda kullanılan ana yöntemlerin başında radyoaktivite kuyu logları gelmektedir. Ayrıca kuyu logu çalışmalarında istatistiksel analizler kullanılması verilerin değerlendirilmesinde oldukça fayda sağlamaktadır. Radyoaktif jeofizik kuyu logu ve istatistik çalışmalarına örnek olarak şu çalışmalar gösterilebilir: Mwenifumbo ve diğerleri 2004 yılında Kanada’ da 11 kuyuda loglar almış ve bunları diğer jeofizik yöntemlerle beraber

değerlendirerek cevher bulundurabilecek jeolojik zonları belirlemişlerdir [6]. Asfahani ve diğerleri, 2012 yılında Suriye’de uranyum radyoaktivite zonlarını belirleme amacıyla havadan gamma spektrometrik verisi almışlar ve bu veriye istatistiksel analiz uygulamışlardır [7]. Gaafar 2015 yılında Mısır’da yaptıkları gamma-ray spektrometre ölçümlerini elektromanyetik yöntemlerin sonuçlarıyla beraber değerlendirmiş ve çalışma alanında cevher barındırabilecek kırıklı zonları tespit etmişlerdir [8]. Asfahani ve diğerleri 2016 yılında Suriye’de aldıkları havadan gamma-ray spektrometre verisi ve istatistiksel analiz ile uranyum cevherinin taşınma ve göçünü izlenmişler ve bunları yerel jeoloji ile ilişkilendirmişlerdir [9].

Regresyon analizi, bir araştırma sonrasında elde edilen veriler arasındaki ilişkiyi matematiksel modellerle belirlemek ve bu modelleri kullanarak çalışma konusuyla ilgili kestirimler yapabilmek amacıyla kullanılmaktadır. Yöntem gözlenmiş veriye matematiksel modelin uyumunu sağlamak için farklı birçok disiplinde araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılmaktadır [10]. Yer bilimlerinde kullanımına örnek olarak deprem tehlike analizi, eğri çakıştırma, veri gruplarını karşılaştırma, geoteknik parametreler için amprik bağıntılar elde etme gibi birçok alan sayılabilir. Utkucu ve diğ. 2005, regresyon analizi ile Düzce depreminin artçı deprem etkinliğini incelemiş ve etkinliğin farklı zaman aralıklarındaki durumlarını kabuktaki gerilmeye ilişkilendirmişlerdir [11]. Sal 2010, ikinci dereceden deprem bölgesinde yer alan Eskişehir ilinde hem sismik hızlardan hem de geoteknik yollardan elde ettikleri parametreleri regresyon analizleri kullanarak karşılaştırmışlardır [12]. Kartal ve diğ. 2014, regresyon analizlerini kullanarak Mersin ilinin deprem tehlike analizleri için bağıntılar geliştirerek tahminlerde bulunmuşlardır [13].

Bu çalışma, Nevşehir İli sınırları içerisinde Uranyum rezervinin tespitine yönelik olarak yapılan kuyu jeofiziği çalışmaları ile laboratuvar çalışmaları sonucunda elde edilen verilerin istatistiksel olarak incelenmesi ve ampirik bağıntıların geliştirilmesi üzerine planlanmıştır. Çalışma konusu olan sahanın seçiminde, saha çalışmasının son yıllarda yapılmış olması, sondaj sayısının fazla olması ve aramaların sistematik bir şekilde yapılması gibi nedenler etkili olmuştur. Sahada ve laboratuvarında elde edilen verilere yapılan istatistiksel analizler neticesinde uranyum

kuyu ölçüm değerinin ve uranyum rezerv miktarının kestirimi için modeller oluşturularak en uygun modeller belirlenmiştir.

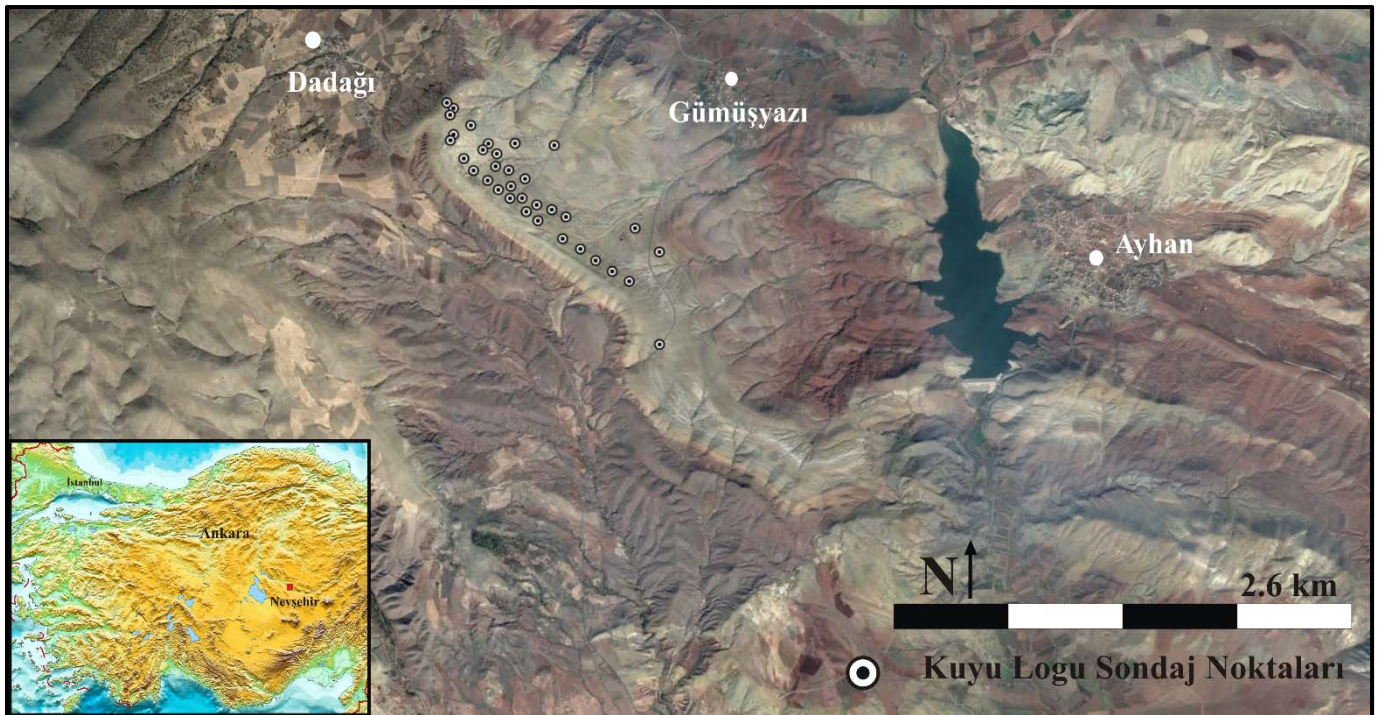
2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLJİSİ VE TEKTONİĞİ (GEOLOGY AND TECTONICS OF STUDY AREA)

Uranyum rezerv tespitinin yapıldığı ve bu çalışmada kullanılan verilerin elde edildiği çalışma alanı, Nevşehir ili Avanos ilçesi civarında olup yaklaşık 4500 hektarlık bir alana sahiptir. Çalışma alanı Nevşehir il merkezine yaklaşık 24 km uzaklıkta olup Gülşehir ilçesine ise yaklaşık 8 km mesafede bulunmaktadır (Şekil 1). Çalışma alanı ve çevresinde çok yoğun tektonik ve volkanik hareketler meydana gelmiştir. Tektonik olarak bölge, Kuzey Anadolu Fay Zonu, Doğu Anadolu Fay Zonu ve Bitlis Zagros kenet kuşağından oluşan üç litosferik çarpışma bölgesi ile çevrilidir.

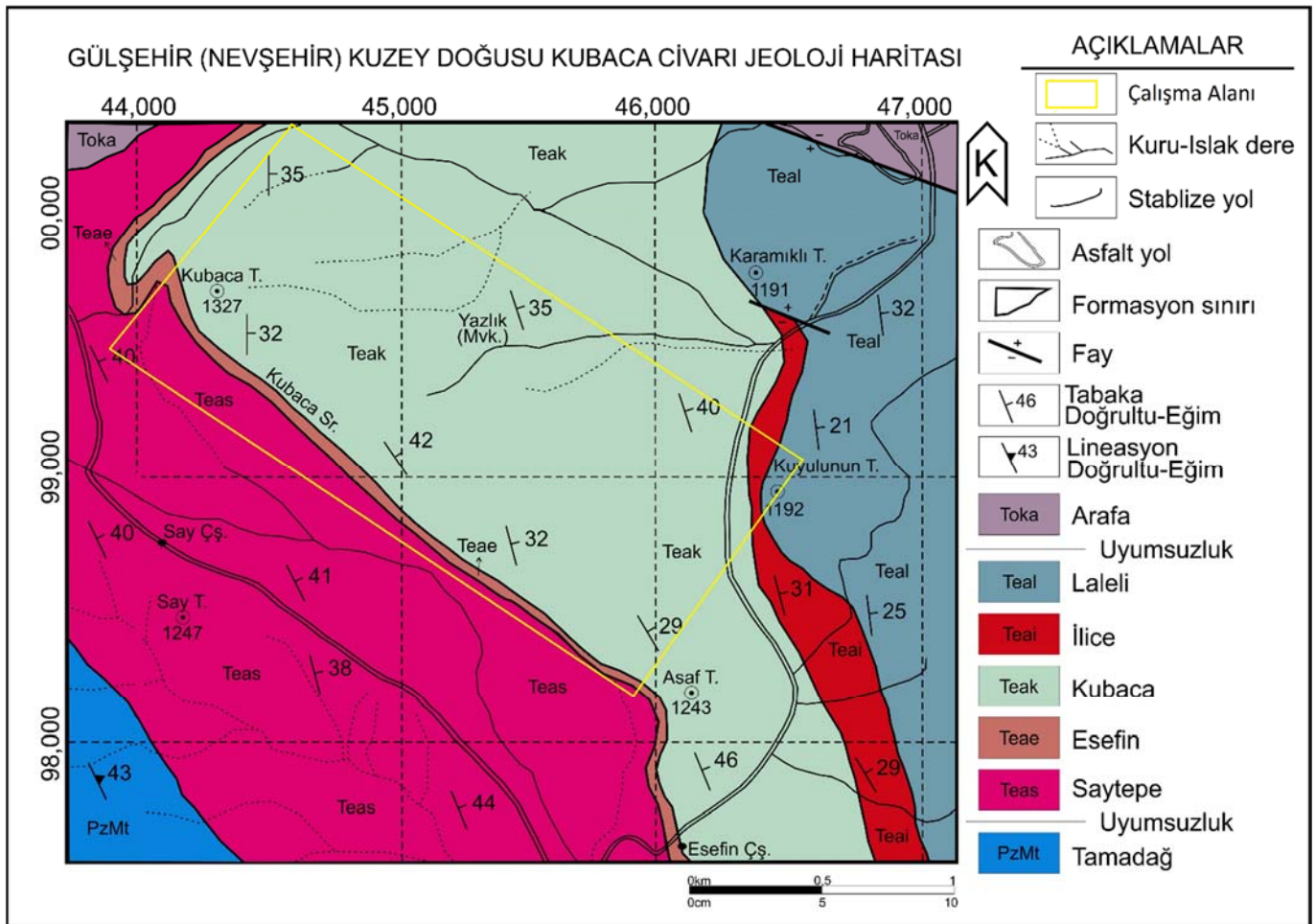
Orta Anadolu volkanik bölgesi, Türkiye'nin en önemli volkanik provenslarından birisi olup KD – GB doğrultulu, genişliği 100-150 km, uzunluğu ise 250 – 300 km arasındadır [14]. Bölge Tuz Gölü Fayı ve Ecemiş Fayı etkisinde kalmış ve bu iki kırık sistemiyle ayrılmıştır. Çalışma alanı ve yakın çevresinde bahsi geçen tektonik hareketler sonucu çeşitli faylar meydana gelmiştir. Bunlara örnek Derinkuyu Fayı, Gümüşkent Fayı sayılabilir.

Ayrıca bölgede açılma çatlak sistemleri mevcut olup meydana gelen kırık sistemlerinin büyük bir kısmı volkanizma ile oluşan yapıların altında gömülü olarak bulunmaktadır [15] [16].

Çalışma sahasının temel kayaçları olarak nitelendirebileceğimiz birimler Paleozoyik yaşlı olan Tamadağ ve Bozçaldağ Formasyonudur. Tamadağ Formasyonu paleozoyik yaşlı şist, mermer, fillat ve kalkşit ardalanmalarından oluşmakta ve her iki formasyonun da tahmini kalınlığı yaklaşık 350 metre olup bu birimlerin üzerinde Ayhan formasyonu, Altıpınar formasyonu ve Paleosen yaşlı kayaçlar yer almakta, üst birimlerde ise Neojen yaşlı Yüksekli ve Kızılöz formasyonları bulunmaktadır. Altaki birimlerle uyumsuz olan Ayhan Formasyonu kıyı akarsu ve göl çökellerinden oluşmakta ve Lütisyen öncesi yaşlı olarak kabul edilmektedir. Ayhan formasyonu kırmızı renkte çamurtaşı, kumtaşı ve silttaşı içeren Kızılöz Formasyonu ise Oligosen yaşlı olup Ayhan Formasyonu'nun üzerine uyumsuz olarak gelmektedir. En üstte ise Üst miyosen yaşlı Yüksekli Formasyonu olup göl ortamı çökellerinden oluşmaktadır [15] [17] [18] [19] [20]. Şekil 2'de çalışma alanının ayrıntılı jeolojik haritası görülmektedir. Şekil 2'de görülen Laleli, İlice, Kubaca, Esefin ve Saytepe üyeleri Ayhan formasyonu içerisinde tanımlanmıştır.



Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası. (Location maps of the study area.)



Şekil 2. Çalışma alanı jeolojisi (Geology map of the study area) [21]

3. METOT (METHOD)

Çalışma saha-laboratuvar ve istatistiksel analiz olmak üzere iki aşamalıdır. MTA tarafından yürütülen projede saha çalışmasında ilk etapta detaylı jeolojik araştırmalar yapılarak sahanın genel jeolojisi ortaya konmuş ve jeolojik istif belirlendikten sonra yüzeyden doğal radyoaktif aramalarına yönelik Gamma-Ray spektrometre cihazı kullanılarak jeofizik çalışmalar yapılmıştır. Jeofizik yöntemin anomali verdiği yerlerde yarma ve karotlu sondaj yapılmasına karar verilmiştir. Sondaj nihai derinliğine ulaştığında sonlandırılıp jeofizik kuyu logu ölçüsüne hazır hale getirildikten sonra Natural Gamma Ray Spektroskopy cihazı bir vinç yardımıyla sondaj kuyusuna, içinde veri akışını sağlayabilecek bir çelik halat vasıtasıyla sarkıtılıp ölçü alınmaktadır. Cihaz yüzey sistemiyle istenilen hızda, istenilen seviyelerde ve istenilen aralıklarda bilgisayar programları (Warrior, Altlogger vb.) aracılığıyla ölçü alınmaktadır. Ölçü başlamadan önce cihaz kalibre edildiği takdirde count, API, %, ppm vs değerlerini alma olanağını sunabilmektedir. Cihazın kalibrasyonu

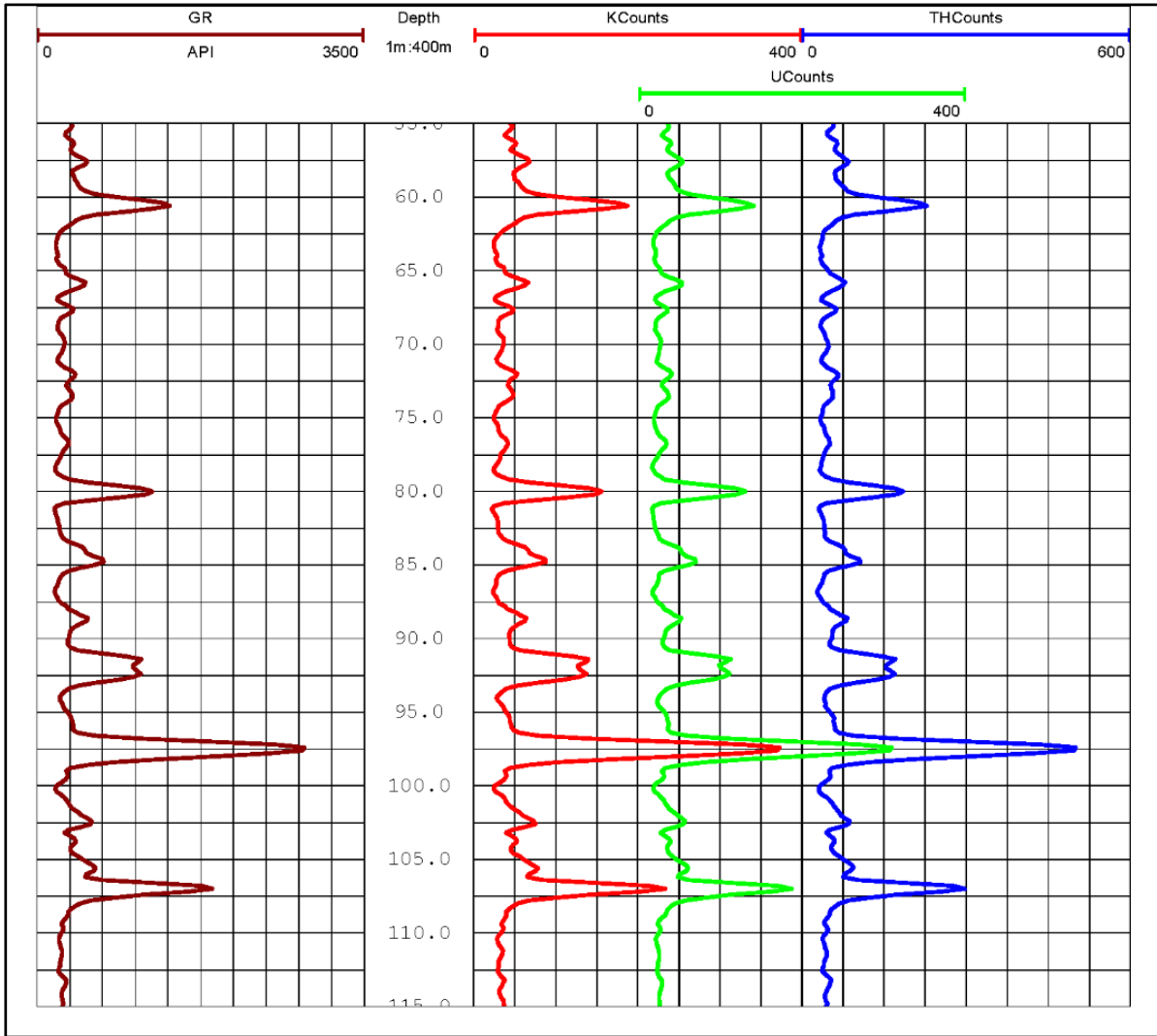
için hemen hemen her ölçü öncesinde sahada özel olarak hazırlanmış belirli aralıklarla yarı ömür ve fiziksel parametreleri bilinen radyoaktif kaynaklar yerleştirilmiş bir kuyudan kalibre edilmesi gerekmektedir. MTA arama sondajı yaptığından dolayı bu iş hem maddi bir yükümlülük hem de zaman kaybı getireceğinden dolayı, veri görünür bir değer olan count cinsinden alınmaktadır. Alınan ölçüler dijital ortamda bir bilgisayar programı (Wellcad) kullanılarak işlenip kullanılmaya hazır hale getirilmektedir. Elde ettiğimiz ölçü ışığında radyoaktif element seviyeleri belirlenir.

Belirlenen seviyelerden alınan numuneler ve yarma işleminden alınan numuneler laboratuvar koşullarında analiz edilmiş ve rezerv hesabı yapılmıştır. MTA tarafından yürütülen Nevşehir-Yeşilöz uranyum projesinde, toplam ilerlemesi 6060,20 m olan 34 adet karotlu sondaj gerçekleştirilmiştir. Bu karotlu sondajlardan ve yapılan altı adet yarmadan 327 adet kimyasal amaçlı numune, 3 adet minerolojik-petrografik amaçlı, 2 adet XRF (X-Ray Floresans) spektrometre amaçlı, 4 adet XRD (X-Ray Difraktometresi) amaçlı numune olmak üzere 336

adet numune alımı gerçekleştirilmiştir. Sondaj kuyularında ayrıca toplam 5955,80 m Spektral Gamma-Ray ölçümü ve alınan karotların detaylı jeolojik determinasyonları yapılmıştır. Sahalarda toplam 70 m³ hacimli altı adet yarma gerçekleştirilmiştir. Bu sahalarda toplam 326 noktada Gamma Ray Spektrometre ölçümü yapılmıştır.

Kuyu logu, açılan sondaj kuyularının derinliğin fonksiyonu olarak bir takım fiziksel özelliklerin (gözeneklilik, yoğunluk, doygunluk, eğim kalınlık, litoloji vs.) çeşitli aletlerle ölçülerek kuyu veya kuyu çevresinde bulunan formasyonlar için bilgi toplanması olarak tarif edilebilir. Teknolojinin gelişmesiyle kuyu içi ve çevresi için çok çeşitli kimyasal ve fiziksel özellikler (radyoaktivite, öz direnç, ses dalgası, kuyu çapı, zemin veya kaya birimlerin mühendislik

özellikleri vb.) ölçülebilmektedir. Kuyu log çalışmalarında alınan bu ölçülerin bazıları borulu bazıları da çıplak kuyulardan alınmaktadır. Çalışma sahasında borulu kuyularda toplamda 34 adet Spektral Gamma-Ray (GR) ölçüsü alınmıştır. Ölçüler kuyu tabanından yüzeye doğru 2 m/s hızıyla alınmaya çalışılmıştır. Alınan veriler proses yapılarak Şekil 3’de örnek görsel olarak verilmiştir. Şekilde Gamma Ray (GR), Uranyum (UCount)), Toryum (THCount) ve Potasyum (KCount) üste anlatılan cihaz yardımıyla alınmaktadır. Cihazın çalışma prensibi, formasyondan gelen gama ışınlarını enerjilerine göre ayırarak formasyondaki potasyum (K), uranyum (U), toryum (Th) ve toplam gamma (GR) miktarları ölçer. Formasyonda bulunan potasyum, toryum ve uranyum gibi radyoaktif elementlerin yayımladıkları Gama ışınlarının enerjisi, o elementlerin saptanmasını sağlamaktadır.



Şekil 3. İnceleme alanında alınmış kuyu logu örneği [21]. Kahverengi çizgi Gamma-Ray (GR), kırmızı Potasyum (K Counts) değerini, yeşil Uranyum (U Counts) değerini ve mavi renk ise Toryum (TH Counts) değerini göstermektedir. Ayrıca düşey yönde değişen sayısal değerler derinliği, yatay yönde değişen değerler de ölçü skalasını göstermektedir. (Well-log example from the study area. The brown line shows Gamma-Ray (GR), red line shows Potassium (K Counts) value, green line shows Uranium (U Counts) value and blue line shows Thorium (TH Counts). Also the values in the vertical direction shows depth and the horizontal values shows the measurement scale.)

4. VERİLER ARASINDAKİ İLİŞKİNİN ANALİZİ (ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN DATA)

Bu çalışmada radyoaktif jeofizik kuyu logu ölçümlerinden elde edilen uranyum, toryum, gamma-ray ölçüm verileri ile karot numunelerinden elde edilen kalınlık ve uranyum rezerv miktarı verileri kullanılmıştır. Bu veriler arasındaki ilişkiler bir belirli fonksiyon ile tanımlanacak nitelikte değildir. Buna rağmen ilgili veriler arasında fonksiyonel olmayan bir bağıntının çıkarılması uygulama da oldukça faydalı olabilmektedir. Bu bağıntı sayesinde var olan veya sonradan elde edilebilecek verileri kullanarak bağımlı değişkenleri tahmin etmek mümkün olabilmektedir. Bu tahmin neticesinde elde edilen değer gerçek değeri kesin olarak sağlamamasına karşın en yakın tahmin değerini sunmaktadır. Bu çalışmada ilgili veriler arasındaki ilişkiyi belirlemek ve bu ilişkileri kullanarak uranyum ve uranyum rezerv miktarı ile ilgili kestirimler ya da tahminler yapabilmek amacıyla regresyon analizi yapılmıştır. Regresyon analizi ile veriler arasında anlamlı bir ilişki bulunup bulunmadığını belirlenmekte ve aralarında ilişki bulunuyor ise regresyon denklemi elde edilmektedir. Regresyon analizi bir bağımlı değişken ile bir veya birden fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkinin matematiksel bir model ile açıklanması işlemidir. Bu model regresyon modeli olarak isimlendirilmektedir. Değişkenler arasındaki ilişki doğrusal veya doğrusal olmayan regresyon analizleri ile incelemek mümkündür. Bu çalışmada ilgili değişkenler arasındaki ilişkiler doğrusal regresyon analizleri ile irdelenmiştir. Doğrusal regresyon analizini basit regresyon analizi (bir bağımlı ve bir bağımsız değişken) ve çoklu regresyon analizi (bir bağımlı değişken ve birden fazla bağımsız değişken) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Regresyon analizinde bağımsız değişken sayısının bir tane olması halinde basit regresyon analizi yapılabilmektedir. Bağımlı ve bağımsız değişkenler grafik üzerinde birer nokta şeklinde gösterilerek serpilme diyagramları oluşturulmaktadır. Genellikle bağımlı değişken Y, bağımsız değişken ise X ile ifade edilmekte ve serpilme diyagramı, düşey eksen Y, yatay eksen ise X alınarak çizilmektedir. Bağımlı değişken regresyon modelinde tahmin edilen değişken olup açıklanan değişkendir. Bağımsız değişken ise açıklayıcı değişken olup bağımlı değişkenin tahmin edilmesinde kullanılmaktadır. Bağımlı

değişken ile bir bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi ifade eden regresyon modeli Denklem 1’de verilmiştir. Çoklu regresyon basit regresyona çok benzemekte olup aralarındaki temel fark bağımsız değişken sayısının çoklu regresyonda birden fazla olmasıdır. Çoklu regresyon için regresyon modeli Denklem 2’de görülmektedir.

$$Y = B_0 + B_1X \quad (1)$$

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_3X_3 + \dots B_kX_k \quad (2)$$

Burada, Y bağımlı değişkeni, X değerleri ise bağımsız değişkenleri ifade etmektedir. B_0 değeri sabit olup $X=0$ olduğunda Y’nin aldığı değeri (Regresyon doğrusunun Y eksenini kestiği başlangıç değeri) ve $B_1, B_2, B_3, \dots, B_k$ değerleri ise tahmin değişkenlerinin katsayılarını göstermektedir.

Oluşturulan regresyon denkleminin ne derece iyi bir tahminleyici olduğunu belirlilik katsayısı (R^2) ile ifade edilmektedir. Yani regresyon modellerinde bağımlı değişkenin bağımsız değişkenler tarafından açıklanma derecesinin bir göstergesidir. Belirlilik katsayısı 0 ile 1 ($0 \leq R^2 \leq 1$) arasında değerler almaktadır. $R^2 = 1$ olduğunda bağımlı değişkenin bağımsız değişken(ler) tarafından açıklanabileceği, $R^2 = 0$ olduğunda ise bağımlı değişkenin bağımsız değişken(ler) tarafından açıklanamayacağı kabul edilmektedir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada uranyum ve uranyum rezerv miktarlarının tahminine yönelik olarak tekli (basit regresyon) ve çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Uranyum ve uranyum rezerv değerleri bağımlı değişken olarak alınmıştır. Uranyum değerinin tahminine yönelik olarak oluşturulan regresyon modellerinde bağımsız değişken olarak GR, K ve Th değerleri, uranyum rezerv miktarının tahminine yönelik olarak oluşturulan regresyon modellerinde ise GR, K, Th, U ve D (kalınlık) değerleri bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiler belirli bir fonksiyon ile tanımlanacak özellik göstermemektedir. Buna karşın Şekil 3’te de görüleceği üzere birbirleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Regresyon analizi kullanılarak elde edilen modeller ile bu veriler

arasındaki ilişkiyi tanımlayabilecek bir bağıntı çıkartılmaya çalışılmıştır. Kuyu logu verilerinden elde edilen uranyum değerinin tahminine yönelik olarak Tablo 1’de görüleceği üzere bağımsız değişkenler için tüm kombinasyonlar denenerek toplam 7 model oluşturulmuştur. Her bir model için R^2 değeri ve standart hata değeri bulunmuştur. 1. modelde R^2 değeri 0,79 ve standart hata değeri 32,57 olarak bulunmuştur. Buna karşın diğer modellerde R^2 değeri 0,984 ile 0,997 arasında ve standart hata değeri ise 3,90 ile 9,01 arasında bulunmuştur.

Uranyum rezerv miktarının tahminine yönelik olarak bağımsız değişkenlerden 30 kombinasyon oluşturulmuştur (Tablo 2). Uranyum değerinin tahmininde kurulan modellerde olduğu gibi rezerv miktarının tahminine yönelik oluşturulan modellerin R^2 ve standart hata miktarları hesaplanmıştır. R^2 değeri 0,22 ile 0,68 arasında değiştiği görülmektedir. Standart hata miktarı ise 0,60 ile 0,94 arasında değişmektedir.

Tablo 1 ve 2’de tanımlanan girdi parametreleri bağımsız değişkenleri tanımlamakta ve her model için bağımsız değişkenlerin katsayıları (B_1, B_2, B_3, B_4 ve B_5) ve Y eksenini kesen sabit değerler (B_0) görülmektedir. Regresyon analizi ile bulunmuş katsayılar Denklem 1 veya 2’ de yerlerine konulduğunda modeller için ampirik denklemler elde edilmektedir.

Uranyum değerinin kestirimi için oluşturulan regresyon modellerinin oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Tablo 1’de görüleceği

üzere R^2 değerlerinin 1’e yakın çıkması, uranyum değerinin GR, K ve Th değişkenleri ile açıklanabileceğini göstermektedir. Bu modeller arasında GR bağımsız değişkenli model diğerlerine nazaran R^2 değeri (0,79) nispeten daha düşük ve standart hata miktarı (32,57) daha yüksek olduğu görülmektedir. Buna göre; K değeri ve Th değeri uranyum değerinin açıklanmasında ve tahmin edilmesinde kısmen daha kullanışlıdır. Uranyum değerinin tahmininde diğer 6 modelin R^2 değeri 0,98’in üzerinde ve standart hata miktarı ise daha düşüktür. Uranyum rezerv miktarının kestirimine yönelik olarak toplam 30 regresyon modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan 30 regresyon modeli içerisinde 15 modelin R^2 değeri 0,50’in üzerinde ve 10 modelin ise R^2 değeri 0,60’in üzerinde çıktığı görülmektedir (Tablo 2). Modeller içerisinde en yüksek R^2 değerlerine sahip olan modeller ($R^2 = 0,68$) 25. model (girdiler; GR, Th, K ve D), 27. model (girdiler; GR, K, U ve D) ve 30. modeldir (girdiler; GR, K, Th, U ve D). Aynı zamanda bu üç modelinde standart hata miktarları (0,60) aynı sonucu vermektedir. Tek bağımsız değişkenden oluşan modellerin R^2 değerleri oldukça düşük ve standart hata miktarları yüksektir. Tek bağımsız değişkenli modellerden GR girdili model diğerlerine (Th, K ve U) nazaran biraz daha iyi uranyum rezerv miktarını açıklayıcı gözükmektedir. Kalınlık değerinin bağımsız değişken olarak kullanıldığı modellerde istatistiksel sonuçlar daha iyi çıkmıştır. Bu durum, uranyum rezerv miktarı ile D (kalınlık) arasında oldukça kuvvetli ilişki olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Uranyum değerinin kestirimine yönelik oluşturulan regresyon modelleri (Regression models for estimating uranium value)

Model	Girdi parametreleri	Regresyon katsayıları				R^2	Standart Hata
		B_0	B_1	B_2	B_3		
1	GR	-59,52	0,12			0,790	32,57
2	K	0,93	0,81			0,994	5,52
3	Th	23,18	0,55			0,984	9,01
4	GR K	-3,19	0,01	0,78		0,995	5,30
5	GR Th	2,24	0,03	0,46		0,995	5,04
6	K Th	5,70	0,63	0,12		0,995	5,10
7	GR K Th	0,33	0,02	0,37	0,25	0,997	3,90

Tablo 2. Uranyum rezerv miktarının kestirimine yönelik olarak Regresyon modelleri (Regression models for estimating the amount of uranium reserves)

Model	Girdi parametreleri					Regresyon katsayıları					R ²	Standart	
						B ₀	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄		B ₅	Hata
1	GR					-0,24	0,001				0,32	0,86	
2	K					0,51	0,005				0,22	0,92	
3	U					0,50	0,007				0,23	0,92	
4	Th					0,69	0,003				0,20	0,94	
5	GR	K				-0,34	0,001	-0,001			0,32	0,86	
6	GR	U				-0,33	0,001	-0,001			0,32	0,86	
7	GR	Th				-0,35	0,001	-0,001			0,32	0,86	
8	GR	D				-1,00	0,001	1,779			0,64	0,63	
9	K	U				0,49	-0,013	0,023			0,24	0,92	
10	K	Th				0,10	0,021	-0,011			0,26	0,91	
11	K	D				-0,41	0,003	1,832			0,55	0,70	
12	U	Th				-0,16	0,037	-0,017			0,30	0,88	
13	U	D				-0,43	0,004	1,827			0,56	0,70	
14	Th	D				-0,32	0,002	1,866			0,54	0,71	
15	GR	K	U			-0,32	0,001	-0,006	0,006		0,33	0,87	
16	GR	K	Th			-0,35	0,001	-0,001	-0,001		0,32	0,87	
17	GR	K	D			-1,32	0,001	-0,002	1,848		0,66	0,61	
18	K	U	Th			-0,14	-0,006	0,043	-0,016		0,30	0,88	
19	K	U	D			-0,48	-0,026	0,036	1,899		0,59	0,68	
20	U	Th	D			-0,10	0,031	-0,015	1,794		0,61	0,66	
21	GR	U	Th			-0,37	0,001	0,008	-0,004		0,33	0,87	
22	GR	Th	D			-1,32	0,001	-0,002	1,848		0,66	0,61	
23	D	K	Th			-0,66	1,791	0,014	-0,007		0,57	0,69	
24	D	U	GR			-1,32	1,858	-0,005	0,001		0,66	0,61	
25	GR	Th	K	D		-1,29	0,002	0,006	-0,015	1,923	0,68	0,60	
26	GR	K	Th	U		-0,35	0,001	0,005	0,014	-0,004	0,33	0,87	
27	GR	K	U	D		-1,31	0,001	-0,019	0,019	1,909	0,68	0,60	
28	K	U	Th	D		-0,97	-0,019	0,052	-0,013	1,851	0,63	0,64	
29	U	Th	D	GR		-1,31	-0,008	0,002	1,863	0,002	0,66	0,61	
30	GR	K	U	Th	D	-1,29	0,002	-0,019	0,013	0,003	1,922	0,68	0,60

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, radyoaktif kuyu logu ve laboratuvar çalışmaları neticesinde elde edilen verileri kullanarak uranyum kuyu logu değerinin ve uranyum rezerv miktarının kestirimine yönelik basit ve çoklu regresyon analizleri yapılmıştır. Uranyum kuyu logu değerinin kestirimine yönelik olarak Gamma-Ray, Toryum ve Potasyum kuyu logu verileri bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Bağımsız değişkenler ile her kombinasyonda oluşturulan regresyon modellerinden Gamma-Ray bağımsız değişkenli modelin iyi, diğer modellerin ise oldukça iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Buna göre uranyum kuyu logu değeri değerinin kestirimi için Tablo 1’de görülen regresyon modellerinin hepsi kullanılabilir. Uranyum rezerv miktarının kestirimine yönelik olarak Toryum, Gamma-Ray, Uranyum, Potasyum ve kalınlık değerleri bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Bu değişkenler için her kombinasyon denenerek toplamda 30 regresyon modeli oluşturulmuştur (Tablo 2). Bu modellerin R^2 değerleri 0,22 ile 0,68 arasında değişmektedir. R^2 değeri 0,50’nin altında olan regresyon modellerinin uranyum rezerv miktarının kestiriminde kullanılması hatalı kestirim sonuçlara neden olabilir. Uranyum rezerv miktarının kestiriminde en iyi sonuçları Tablo 2’de görülen 25. (Bağımsız değişkenler; Gamma-Ray, Toryum, Potasyum ve kalınlık), 27. (Bağımsız değişkenler; Gamma-Ray, Potasyum, Uranyum ve kalınlık) ve 30. (Bağımsız değişkenler; Gamma-Ray, Potasyum, Uranyum, Toryum ve kalınlık) modeller vermiştir. Uranyum rezerv miktarının kestiriminde en etkili parametrenin kalınlık olduğu görülmüştür. Bu çalışmada regresyon analizi ile elde edilen ampirik formüllerin, çalışma alanı veya benzer oluşum, jeolojik yapı ve özelliklere sahip sahalarda kullanılması daha uygundur.

TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada, MTA (Maden Tetkik Arama) genel müdürlüğü tarafından desteklenen 2012-33-13-09, 2013-33-13-21 “Nevşehir Avanos Uranyum Ruhsat Etütleri.” projeler kapsamında elde edilen veriler kullanılmıştır. Verilerin kullanılmasına izin veren MTA genel müdürlüğü tüm çalışanlarına ve proje ekibine çok teşekkür ederiz.

REFERENCES

- [1] H. Kaplan, “Uşak Eşme Bölgesi Jeolojisi Uranyum Zuhurları Hakkında Rapor Rap. No. 9545,” MTA, Ankara, 1945.
- [2] G. Zeschke, “Bolkardağ Madeninde Uranyum Prospeksiyonu Rap. No. 2213,” MTA, Ankara, 1953.
- [3] N. Yasak, “Keskin-Yozgat-Avanos-Aksaray-Ulukışla-Kırşehir civarı uçak etüdü Rap.No. 8475,” MTA, Ankara, 1958.
- [4] İ. Çetintürk, “Arafa-Göynük-Alacaşar-Ulukışla bölgeleri radyoaktivite etüdü Rap. No. 3170,” MTA, Ankara, 1968.
- [5] S. Uçakçioğlu, “Nevşehir-Gülşehir ve civarı uranyum aramaları raparı Rap No. 8453,” MTA, Ankara, 1987.
- [6] C. Mwenifumbo, B. Elliott, C. Jefferson, G. Bernius ve K. Pflug, “Physical rock properties from the Athabasca Group:designing geophysical exploration models for unconformity uranium deposits,” *Journal of Applied Geophysics*, no. 55, pp. 117-135, 2004.
- [7] J. Asfahani, R. Al-Hent ve M. Aissa, “Radioactive and geological analysis of airborne gamma spectrometric data for locating favorable traps for uranium prospecting in the Syrian desert (Arae-1), Syria,” *Applied Radiation and Isotopes*, no. 70, pp. 2317-2327, 2012.
- [8] İ. Gaafar, “Application of gamma ray spectrometric measurements and VLF-EM data for tracing vein type uranium mineralization, El-Sela area, South Eastern Desert, Egypt,” *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, no. 4, pp. 266-282, 2015.
- [9] J. Asfahani, R. Al-Hent ve M. Aissa, “Uranium remobilization and migration evaluation through aerial spectrometric gamma technique in Syrian Desert (Area-1), Syria,” *Applied Radiation and Isotopes*, no. 107, pp. 278-292, 2016.
- [10] S. Öztürk, “İstatistiksel Regresyon Yöntemlerinin Farklı Veri Gruplarına Uygulanması Üzerine Bir Analiz,” *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, no. 2, pp. 55-57, 2012.

- [11] M. Utkucu, C. Çetin, Ö. Alptekin, “12 Kasım 1999 Düzce depremi artçı depremlerinden hesaplanan b ve p değerlerinin uzaysal ve zamansal dağılımı ve gelecekteki sismik tehlike açısından değerlendirmeler, “ *Yerbilimleri (Earth Sciences)*, no. 26, pp. 75-91, 2005.
- [12] Z. Sal, Makaslama Dalga Hizi İle Konik Penetrasyon Testisonucu Hesaplanan Geoteknik Parametreler Arasındaki İlişkiler, Yüksek Lisans Tezi, Ankara: Ankara Üniversitesi Müh. Fakültesi, 2010.
- [13] R. F. Kartal, T. Kılıç, F. T. Kadiroğlu, “Olasılık Ve İstatistik Yöntemler İle Mersin İlinin Sismik Tehlikesinin Tahmini, “ 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, Ankara, 11-14 Ekim 2011.
- [14] F. Aydın, “Kapadokya Volkanik Kompleksinin Gelişimi ve Volkanizmanın Bölge Üzerindeki Etkileri,” *1. Tıbbi Jeoloji Çalıştayı*, Nevşehir, 30 Ekim–1 Kasım 2009.
- [15] G. Pasquare, S. Poli, L. Vezzoli ve A. Zanchi, “Continental arc volcanism and tectonic setting in Central Anatolia, Turkey,” *Tectonophysics*, no. 146, pp. 217-230, 1988.
- [16] V. Toprak ve M. Göncüoğlu, “Tectonic control on the development of the Neogene-Quaternary Central Anatolian volcanic province, Turkey,” *Geological Journal*, no. 28, pp. 357-369, 1993.
- [17] G. Pasquare, “Geology of the Cenozoic volcanic area of Central Anatolia,” *Atti della Accademia Nazionale dei Lincei*, no. 9, pp. 53-204, 1968.
- [18] İ. Seymen, Kaman dolayında Kırşehir masifinin jeolojisi, Doktora Tezi, İstanbul: İTÜ Maden Fakültesi, 1981.
- [19] E. Atabey, N. Tarhan, H. Yusufoglu ve M. Canpolat, “Hacıbektaş, Gülşehir, Kalaba (Nevşehir)- Himmetdede (Kayseri) arasının jeolojisi MTA Rap. No 8523,” MTA, Ankara, 1988.
- [20] E. Atabey, “MTA Genel Müdürlüğü 1/100.000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Kayseri H-19 Paftası,” MTA, Ankara, 1989.
- [21] MTA Genel Müdürlüğü, “Nevşehir Avanos Uranyum Ruhsat Etütleri,” Proje No 2012-33-13-09, 2013-33-13-21, MTA, Ankara, 2016.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 15.08.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 21.11.2016	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.416658	

Bir tekstil firmasında satış tahminleri üzerinden emniyet stoğu gün sayısının sistem dinamiği yaklaşımıyla belirlenmesi

İbrahim Çil^{1*} Ebru Karaduman², Kübra Nur Özçetin² ve Mümtaz İpek²

ÖZ

Karmaşık bir sistemin çözümlenebilmesi nedensel döngü diyagramları kurularak veya sistemin dinamikleri araştırılıp incelenerek mümkün olmaktadır. Günümüzde teknolojinin de gelişmesiyle birlikte firmaların kar elde edebilmeleri için mevcut sistemlerine çok iyi hakim olup üretim planlamalarını çok iyi bir şekilde yaparak müşteri memnuniyetini en üst düzeyde tutmalarına ihtiyaçları vardır. Firmalar ancak bu şekilde rekabet ortamında ayakta durabileceklerdir. Bu çalışmada yapılan satış miktarları üzerinden nasıl bir emniyet stoğu politikası belirlenmesi gerektiği, bu sistemin ne gibi dinamiklerden etkilendiğinin tespitleri yapılmış ve öngörülerde bulunulmuştur. Bir tekstil firması için nedensel döngü diyagramı geliştirilmiştir. Bu firmanın emniyet stoğu bekleme süresini sistem dinamiği yaklaşımıyla simüle ederek stok politikası ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Emniyet stok gün sayısı, Sistem dinamiği, Nedensel döngü diyagramı, Stella.

Determination of safety stock day number with system dynamic approach over forecasts sales for a textile company

ABSTRACT

A complex system is allow to able to be resolved by establishing a causal loop diagrams or explored by examining the dynamics of the system. Today, along with the development of technology, companies is also very good to be able to profit from the current system dominated, by the production planning very well, they need to keep customer satisfaction at the highest level. Companies will be able to stand in this way, but in a competitive environment. In this study, it is required to determine how a safety stock policy on sales volumes made, it has been made in the detections and predictions about this system affected by which dynamics. Causal loop diagram is developed for a textile company. This company's safety stock waiting time is simulated with the system dynamics approach, inventory policy has been put forward.

Keywords: Safety stock day number, System dynamics, Causal loop diagram, Stella.

¹ Prof.Dr.İbrahim Çil

* Corresponding Author

² Endüstri Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, icil@sakarya.edu.tr

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir ülkenin ekonomisi o ülkenin gelişmişlik düzeyini göstermektedir. Ekonominin büyümesi ve gelişmesi üretim sonucu elde edilen gelir ile doğru orantılıdır. Üretim planlarının doğru yapılması ile firmaların gelir düzeyleri artmaktadır. Günümüzde ürünleri tek seferde doğru üretebilmek kadar doğru arz piyasasında doğru satışları yapmakta önemlidir. Klasik üretim mantığına sahip çoğu firma sadece üretim yapmaya odaklıdır. Her türlü durumda ürünlerini satabileceğini düşünmektedir. Ancak globalleşen dünya ile birlikte teknolojinin ilerleyip üretici firmalar arasında rekabetin artmasıyla üretilen ürünlere pazar oluşturmak üretim yapabilmek kadar büyük amaç haline gelmiştir. Bu yüzden iyi bir üreticiyi destekleyecek en büyük unsurlardan biri de satış pazarlamasıdır. Firmaların satış pazarlama departmanları ne kadar kuvvetli başarılı ise satış miktarları da o kadar fazla demektir. Diğer bir taraftan sadece ürünü iyi pazarlamak yetmez. İyi bir üretim gerçekleştirmesi ve gerçekçi bir stok politikası belirlemesi gerekmektedir [1]. Bir pazarlamacı üretim sistemine güvendiği kadar müşteri taleplerine cevap verebilir.

Ürünler sistemden belirlenen standart sürelerde çıkarılamıyorsa sistemde iyileştirilmesi gereken noktalar var demektir. Böyle bir durumda pazarlamacı ürünü satmış olsa dahi termin sürelerinden kaynaklı veya kalitesizlikten kaynaklı sorunlar yaşıyorsa sistemin güvenli olmadığı ve müşteri memnuniyetsizliklerinin yaşanacağı görülmektedir [2].

Doğru stok politikasının belirlenmesiyle üretim planları en optimal şekilde yapılacaktır. Böylece yanlış stok politikaları uygulanmayacak ve gereksiz yere stokta mamul bekletilip firmanın maliyetleri arttırılmayacaktır. Müşteri talepleri de düzgün olarak karşılanacaktır. Dolayısıyla firmaların önceliği olan müşteri memnuniyeti sağlanmış ve gereksiz stok maliyetlerine katlanılmamış olacaktır.

Bu çalışmada yapılan satış miktarlarından hareketle nasıl bir emniyet stoğu politikası belirlenmesi gerektiği araştırılmaktadır. Ayrıca sistemin ne gibi dinamiklerden etkilendiği tespiti yapılarak sistem dinamiği yaklaşımıyla öngörülerde bulunulacaktır. Bu amaçla bir tekstil firması için dinamik sistem modelleme yöntemiyle bir nedensel döngü diyagramı geliştirilerek, bu

firmanın emniyet stoğu bekleme süresini simüle ederek firma için bir stok politikası ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu amaçlar doğrultusunda çalışmanın geri kalan kısmında aşağıdaki konular üzerinde durulacaktır.

Bu çalışmada öncelikle stok politikasının belirlenmesi ve sistem dinamiği yaklaşımıyla ilgili bir literatür araştırması yapılacaktır. Daha sonra sistem kavramı, dinamik sistem modelleme aracı olarak sistem dinamiği yaklaşımı konuları üzerinde durulacak. Akabinde stok ve stok politikaları açıklandıktan sonra Nedensel Döngü Diyagramı ve Stella yazılımı ele alınacaktır. Ardından gerçekleştirilen bir uygulama ayrıntılı olarak sunulacaktır. Bu kapsamda uygulamanın kapsamı, belirlenen problem, dinamik sistem modellemesi ve benzetim sonunda elde edilen deneysel bulgular ele alınacaktır. Sonuçların değerlendirilmesi ve yapılacak yeni çalışma önerileri çalışma bitirilecektir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Stok yönetimi en uygun stok miktarını belirleme ve stokların kontrol edilme faaliyetlerini kapsar [3], [4]. Öncelikle etkin bir stok yönetimi firmalara tedarik süresinden maliyetlere kadar yüksek performans sağlar. Stok yönetimi diğer sektörlerde olduğu gibi tekstil sektöründe de oldukça önemli bir yer tutar [5]. Tekstil sektörünün dinamik yapısı gözönüne alındığında, stokların yönetiminde sistem dinamiği yaklaşımı önemli potansiyel katkılara sahiptir [6]. Literatür bakıldığında bu doğrultuda oldukça çok sayılabilecek çalışma yapılmıştır.

Sistem dinamiği konusunda çok sayıda çalışma yapılmış olmasına karşılık, ihtiyaçtan dolayı her geçen gün konuya karşı büyük bir ilgi ve potansiyelin olduğu görülmektedir. Modern anlamda tedarik zincirinin belli noktalarında oluşan stokların yönetiminde birçok alanda yaygın olarak kullanılan sistem dinamiği yaklaşımı, tekstil sektöründe sınırlı sayıda çalışmada kullanılmıştır [7]. Bu durum gözönüne alındığında yapılan bu çalışma sektör itibariyle literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Sistem dinamiği endüstriyel sistemlerin araştırılması amacıyla ilk olarak J.W. Forrester tarafından MIT de 1950'lerin sonlarında geliştirilmiş güçlü bir metodolojidir [8]. Sistem dinamiği yöntemi gücünü sistem teorisi,

organizasyon teorisi, kontrol teorisi, karar teorisi, bilişim, sibernetik ve askeri oyunlardan almaktadır. Yöntem model geliştirmede standart nedensel döngü diyagramlarını kullanmaktadır ve bu diyagramlar problemin dinamik hipotezini oluştururlar [9]. Sistem dinamiği yaklaşımında amaç eniyileme olmayıp, değişimler karşısında sistem davranışını incelemek ve bu davranışları düzenleyecek stratejileri belirleyerek karar vermeye yardımcı olmaktır [10], [11].

Geçen zaman içerisinde sistem dinamiği çok geniş problem alanlarına uygulanmıştır. Bu kapsamda belli başlı çalışma alanlarının başında; Stratejik planlama ve politika geliştirme [12], [13], [14], kamu yönetimi ve siyaset bilimi [15], sağlık sistemlerinin modellenmesi [16], enerji ve çevre [17], doğal ve sosyal bilimlerde teori geliştirme [18], ve tedarik zinciri yönetimi [19] gelmektedir.

Stok yönetimi çoğunlukla dinamik ortamlarda gerçekleştirilir ve sistem dinamiği de dinamik sistemlerin modellenmesi ve analizinde kullanılan temel bir yaklaşımdır. Bundan dolayı sipariş miktarlarının periyodik hesaplanması, yeniden sipariş verme noktaları, emniyet stok seviyelerini belirleme ve politikaları gözden geçirme zorlukları içeren durumlardır. Karar vericiler bahsedilen tüm bu durumları doğru şekilde takip edip kontrol etmek ve gerekli müdahalelerde bulunmak zorundadırlar Bu tür sistemlerin yönetilmesi, takip edilmesi gerekli müdahalelerin yapılmasında sistem dinamiği yaklaşımından daha elverişli bir yaklaşım yoktur [20], [21]. Bu nedenle stok yönetimini de kapsayan tedarik zinciri yönetimi sistem dinamiği yaklaşımının en çok kullanıldığı bir alandır [22], [23], [24]. Sistem dinamiği kaldıraç gücü yüksek politikalar belirleyerek sistemin bu politikalara karşı politik direncin etkisinden kaçınma amacıyla olduğu için nedensel döngü diyagramı sistemin içyapısını, geri bildirimleri, zaman içerisindeki sistemin davranış örüntülerini temsil etmede önemli bir rol üstlenir. Stok yönetimi dinamik yapısı ve diğer işletme fonksiyonlarıyla olan karmaşık ilişkileri nedeniyle, etkin stok politikaları geliştirme zor bir iştir. Zwickler, stok ve üretim planlamada sistem dinamiği yaklaşımının temel yapısını tanımlayarak geliştirilen iki modelle stok yönetiminde etkin bir yöntem olduğunu göstermiştir [25].

Tedarik zincirinin değişik noktalarında oluşan stokların yönetiminde sistem dinamiğinin kullanılması bir duraklamadan sonra tekrar araştırmacıların ilgi alanı olmuştur. Tedarik zinciri yönetiminde sistem dinamiği modellenmesi daha

çok stok kararları, politika geliştirme ve tedarik zinciri ağı tasarımı konularında yoğunlaşmaktadır [26]. İlk olarak Jay Forrester 1961 de tedarik zinciri içerisinde tekrar sipariş verme ve stok yenileme faaliyetlerinin analizini yapmıştır. Bu çalışmanın temelini oluşturan emniyet stoklarının sebep olduğu kamçı etkisi de yine ilk kez Forrester tarafından açıklanmıştır. Kamçı etkisi tedarik zincirinde, müşteri ihtiyaçlarının maksimum seviyelere ulaştığı durumların stoklarda yaratacağı büyük dalgalanmaları ifade eder [27]. Kamçı etkisini araştırmak amacıyla sistem dinamiği yaklaşımı kullanılarak çok sayıda araştırma yapılmıştır [28], [29]. Sistemdeki gecikmeler ve salınım davranışının etkisi yine araştırmacıların üzerinde çalıştığı temel bir konu olmuştur. Yasarcan ve Barlas, stok yönetim sistemlerinde gecikmeleri ele alan genel bir kural olmadığından hareketle, stok yönetim problemleri için birleşik gecikmeleri de kapsayan genelleştirilmiş bir stok kontrol formülü üzerine çalışma yapmışlardır [30]. Çalışmanın sonunda uygulamadaki sorunların üstesinden gelmek için stok türlerinin avantaj ve dezavantajları ayrıntılı olarak tartışılmıştır.

3. SİSTEM KAVRAMI (SYSTEM DESCRIPTION)

Belirlenen sınırlar içerisinde parçalar ve bu parçalar arasında ilişki kurulabilen herhangi bir şeye sistem denilmektedir. Sistemin tanımındaki en önemli unsur 'ilişki' kavramıdır. Örneğin; yönetim sistemi, ekosistem, vücut sistemi vb. Karmaşık sistemler ise gecikme ve geri beslemelerden dolayı ilişkilerin doğrusal olmadığı sistemlere denir.

Karmaşık sistemlere yatırımın gerçekleşme süresi, işe yeni alınan birinin eğitilmesi, ürün kalitesi ile ilgili bilgi sahibi kişinin bu bilgiyi diğer kişilere aktarıp diğer kişilerin ise başka kişilere aktarması örnek verilebilir. Karmaşık bir sistemin davranışını anlayabilmek oldukça zordur. Bunun için o sistem hakkında model kurabilmek gerekir. Bu model kurulumu kişiden kişiye değişeceği için sonuçlar denenebilir, doğrulanabilir ve tartışılabilir bir model olacaktır. Fakat bu model zihinsel bir model değil de matematiksel bir model olmalıdır [31], [32]. Model bilgisayar yardımıyla arayüz kullanılarak yapılabilir. Kullanılan benzetim programı yardımıyla modelin davranışı sayısal verileri kullanarak raporlanabilir.

4. SİSTEM DİNAMİKLERİ (SYSTEM DYNAMICS)

Sistem dinamiği, karmaşık sistemleri anlamayı ve istenen yönde değiştirilmesini sağlayan politikalar geliştirmeyi hedefleyen bir yaklaşımdır. Sistem davranışını etkileyen geri besleme ve gecikmeli tepkiler ile ilgilenir. Sistem dinamiğine ilişkin ifadeler ilk defa 1940-1950 yılları arasında ortaya atılmıştır. Günümüze kadar birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda daha çok sosyal konular ele alınmıştır.

Sistem dinamiği ile birçok alanda çalışılabilir. Bunlar; sistem yönetimi, endüstri dinamiği, çevre bilimi, doğal kaynaklar, enerji, insan kaynakları, toplum bilimi, yerleşim ve taşıma, finans, kent dinamiği, ekonomik kalkınma, dünya dinamiği olabilir.

Sterman'a göre Sistem dinamiği yaklaşımı dört temel özellik üzerinde odaklanmıştır. Bunlardan ilki, bütün dinamik davranışların, akışlar ile bunların toplandığı stoklarla temsil edilebilmesidir [33]. Örneğin bir su havuzu sisteminde, havuz stok, havuzu dolduran veya boşaltan musluklar akıştır. İkinci temel özellik, sistemdeki stok ve akışların geribesleme döngüleri içinde olmasıdır. Geribesleme, sebep-sonuç ilişkilerinin ilk çıktığı kaynağa geri dönmesidir. Üçüncü temel özelliğe göre herhangi bir sistemdeki sebep-sonuç ilişkileri, doğrusal olmayan biçimlerde birleşir. Yani, sistemin stokları hakkındaki geri besleme ilişkileri, stokları kendileriyle doğru orantılı olmayan şekilde etkiler. Son temel özellik ise, sistemin doğasında olan ve birbiriyle etkileşim içindeki akışlar, geribesleme döngülerinin ve doğrusal olmayan ilişkilerin oluşturduğu ağı dinamik davranışının analitik olarak çözülememesidir. Bu nedenle karmaşık sistemlerin dinamik davranışını ortaya çıkarmak için bilgisayar simülasyonu zorunludur [34], [35]. Genel olarak sistem dinamiğinin iki amacı vardır. Bunlardan birincisi; sistem yapısı ve politikaları açısından sistemin yapısını açıklamaktır. İkincisi ise; yapıda, politikada veya her ikisinde de değişimler önererek sistemin performansında iyileşmeler sağlamaktır.

5. STOK KAVRAMI (STOCK DESCRIPTION)

Stok, gelecek talepleri karşılamak için biriktirilen mal veya bir üretim sisteminde ürüne doğrudan veya dolaysız olarak katılan özellikler ile ürüne

verilen isimdir. Stoğun sürekli ve etkin kontrolü firmalar için oldukça önemlidir. Firmalar her ne kadar stok seviyesini düşük tutmak istese de bazen firmaların ekonomisi açısından bu durum mümkün olmayabilir. Fakat stoklu olarak çalışmak termin süresinin kısılmasını sağlar. Bu durum müşteri memnuniyetinin sağlanması anlamına gelir.

Üretim yapan her firma kendi iş alanına göre bir stok politikası belirlemelidir. Yanlış yapılan stok politikaları firmaları küçümsemeyecek derecede zarara uğratar [36]. Uygun stok politikası ile üretim planlanır ve birbiriyle ilişkili olan maliyetler en düşük düzeyde tutulur.

5.1. Stok Gün Sayısının Belirlenmesi (Stock Day Number Determination)

İşletmelerin sistemlerinin göstergelerle ifade edilmesi son derece önemli bir husustur. Bu göstergeler işletmeler hakkında önemli ipuçları verirler. Bunlardan en önemlileri stok devir hızı ve stok gün sayısıdır.

$$Stok_Devir_Hızı = \frac{Satılan_Malın_Maliyeti}{(DönemBaşıStok + DönemSonuStok) / 2} \quad (1)$$

Stok devir hızı, stoklarının bir yıl boyunca kaç kez satılıp, yerine yenisinin konulduğunu ifade etmektedir. Diğer bir ifadeyle satış cirosu olarak adlandırılabilir. Stok devir hızı yüksek ise genellikle düşük giderler ile çalışılmakta ve yüksek oranda net kar sağlanmaktadır. Firmalar stok devir hızlarını hep yüksek değerde tutmayı hedeflerler. Formülasyonu aşağıdaki gibidir;

Stok Gün Sayısı, mevcut stoğun ne kadar daha yeteceğini gösterir. Satış değerleri üzerinden stokların karşılanıp karşılanamayacağını veya stok fazlasını gösterir. Formülasyonu aşağıdaki gibidir;

$$Stok_Gün_Sayısı = \frac{365(gün)}{Stok_Devir_Hızı} \quad (2)$$

6. NEDENSEL DÖNGÜ DİYAGRAMI VE STELLA YAZILIMI (CAUSAL LOOP DIAGRAM AND STELLA SOFTWARE)

Nedensel Döngü diyagramlarının temelinde nedensellik vardır. Değişkenler arasındaki neden-sonuç ilişkilerini anlamak ve modellemek esastır.

Nedensellik, neden sonuç ilişkileri üzerinde düşünmeyi esas almaktadır. Nedensel ilişkide, örneğin $y = f(x)$ de girdi değişkeni x 'in, çıktı değişkeni y üzerinde bir etkisinin olduğunu ifade eder. Nedensel Döngü Diyagramları, dinamik bir sistemin etkileşimlerini ve sistemin elemanlarının karşılıklı ilişkilerini anlamayı kolaylaştıran bir araçtır. Sistemin yapısının davranışını nasıl ürettiğini gösterir. Bu diyagramlarda neden sonuç olur, sonuçta neden olur. Döngü boyunca değişen neden-sonuç ilişkilerini inceler.

Diyagram, basit veya karmaşık sistemin belirli bir bölümünü açıklar. Sistemde bir değişken seçilir ve zaman boyunca o sistemin davranışı incelenir. Nedensel Döngü Diyagramları üç bölümden oluşur:

1. Neden-Sonuç ilişkileri ile ilişkilendirilmiş değişkenler (ör: stok bekleme süresi)
2. Hangi elemanın hangi elemanı etkilediğini gösteren oklar \longrightarrow
3. Okların yanında, ilişkinin yönünü gösteren semboller (+), (-)

Değişkenler: sistemin içerisinde bulunduğu bir durumda hem etkileyen ve hem de etkilenen bir elemandır. Değişkenler bir olay değildir, zamanla artar yada azalır. Eylem ifade eden kelimelerle ifade edilmezler.

Oklar: İki değişken arasındaki yön ve etkiyi gösterirler. Okların üzerindeki pozitif (+) ve negatif (-) işareti değişkenlerin birinin diğeri üzerindeki etkisini gösterir. Etki ile tepki ikisi de aynı yönde artma yada azalma gösteriyorsa pozitif olarak işaretlenmektedir. Etki artarken tepki azalıyorsa yada etki azalırken tepki artıyorsa negatif olarak işaretlenmektedir.

Değişkenler arasındaki (+) ve (-) neden-sonuç ilişkisi iki durumdan oluşmaktadır.

$A \xrightarrow{+} B$, A' da ki bir değişim, diğer faktörler aynı kalmak suretiyle B' de aynı yönde bir değişime sebep olmaktadır.

$A \xrightarrow{-} B$, A' da ki bir değişim B' de ters yönde bir değişime neden olur.

STELLA ise kullanımı kolay ve sezgisel bir modelleme programıdır. STELLA'da model oluşturma kısmında 4 adet araç kullanılmıştır [37]. Bunlar;

Stok (stock): STELLA'nın en önemli bloğudur. Modelde birikimli değişkenlerin gösterilmesini

ifade eder. Örnek olarak, suyun birikimi, nüfus, uyuşturucu bağımlılığı, kadına şiddet verilebilir.

Akış (flow): Bir yönü olan, birim zamanda stoğa giriş ve çıkışı gösteren bir bloktur. Yani akış değişim miktarı veya değişim hızını gösterir. Sistem herhangi bir durumda durdurulduğunda birikmiş olan elemanları gösteren stoktur. Akış ise durdurulan zamanda sıfır değerini alabilen bir model aracıdır. Akış stoğu artırır veya azaltır. Akış sabit bir değer alamaz.

Dönüştürücü (conventor): Akışı yöneten bir bloktur. Modeli daha anlaşılır yapması için, bütün bilgileri akışta toplamak yerine dönüştürücüler sayesinde daha ayrıntılı ve işe yarar bilgiler tanımlanabilir. Sabit değerleri saklamak için de kullanılır.

Bağlayıcı (connector): Akışlar ve dönüştürücüler arasındaki bilgi aktarımını sağlar.

7. UYGULAMA (APPLICATIONS)

7.1. Problemin Tanımı (Problem Description)

Bir tekstil firması mevcut durumda satış tahminleri üzerinden o ay ki miktarı ürettikten sonra bir sonraki ayın satış tahmin miktarı üzerinden, makine kapasitesi ne kadar boşsa o kadar üretim gerçekleştirmektedir. Yani bir sonraki ay için stokta tutulacak emniyet stoğu miktarını o ay ki boş makine kapasitesi belirlemektedir. Böylece emniyet stoğunun bekleme süresi her ay için değişiklik göstermekte ve firma fazla stok maliyetine katlanmak zorunda kalmaktadır. Bu çalışmada bir ürün için bir yıllık satış miktarları dikkate alınarak üreteceği emniyet stoğu miktarının en az maliyetle kaç gün için olacağı tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

7.2. Geliştirilen Nedensel Döngü Diyagramı (Developed Causal Loop Diagram)

Nedensellik, olayların ve olguların birbirlerine bağlı olması veya her şeyin bir nedene bağlı olarak açıklanabilmesidir.

Karmaşık bir sistemin nedenleri ve sonuçları nedensel döngü diyagramı sayesinde görülebilir. Tespit edilen problemlerle ilgili karar verilmeden önce sistem içindeki tüm neden sonuç ilişkilerinin tespit edilmesi sistemin anlaşılmasını kolaylaştırmaktadır. Neden sonuç ilişkileri tespit edilen sistemler üzerinden gelişim veya değişim politikaları oluşturmak daha verimli sonuçlar elde

edilmesini sağlar. Çünkü değişken veya karar mekanizması değiştiğinde hangi değişkenlerin veya karar mekanizmalarının etkilenebileceği tespit edilebilir hale gelmiştir. Yapılan çalışmada tekstil firmasının mevcut karmaşık sistemine ait nedensel döngü diyagramı Şekil 2'deki gibidir;

Çizilen bu diyagram ile firmaya ait müşteri talepleri, yapılan satış tahminleri, üretim miktarları, ürünlerin stokta bekleme süreleri, stokta satılmayı bekleyen üretim miktarları ve karşılanması gereken müşteri taleplerinin birbirleriyle olan dolaysız etkileşimleri incelenmiştir. Hepsinin birbirleriyle olan neden-sonuç ilişkileri gösterilmiştir.

Nedensel döngü diyagramı çizilen bu sistemin bir bölümü STELLA simülasyon paket programıyla modellenerek stok hareketleri incelenmiş ve fabrikanın hedeflediği stok politikasına uygun stok bekleme süresi belirlenmiştir.

7.3. Stok Gün Sayısının Belirlenmesi (Stock Day Number Determination)

Stok gün sayısını belirleme yöntemi bilgileri doğrultusunda çalışma yapılan tekstil firmasının Stok Gün Sayısı aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Öncelikle geçmiş yılın satış değerleri toplanmış ve maliyet hesaplaması yapılmıştır.

Yıllık toplam satış değeri 78441 metre olarak tespit edilmiştir. Ürünün bir metresinin maliyeti 7 TL'dir. Böylelikle satılan malın maliyeti 549.087 TL olmaktadır. Dönem başı stoğu = 2896 metre, Dönem sonu stoğu = 4094 metredir. Stoğun elde bulundurma maliyeti metre başına 3 TL'dir. Tüm bu veriler stok devir hızı formülasyonuna konulduğunda;

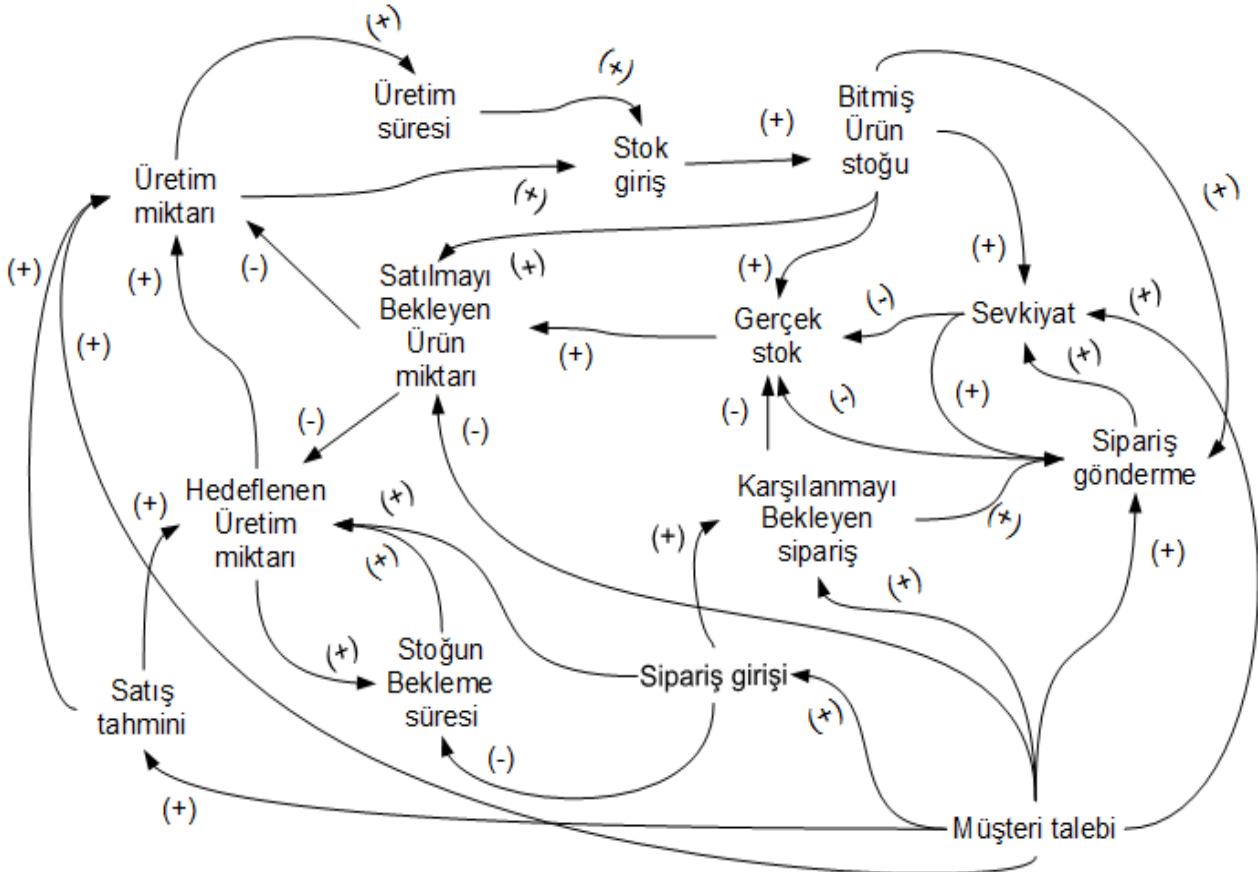
$$Stok_Devir_Hızı = \frac{78441*7}{(2896+4094)*3/2} = 52,37 \quad (3)$$

Değeri bulunur. Bu durumda stok gün sayısı;

$$Stok_Gün_Sayısı = \frac{365}{52,37} = 6,97 \approx 7 \text{ gün} \quad (4)$$

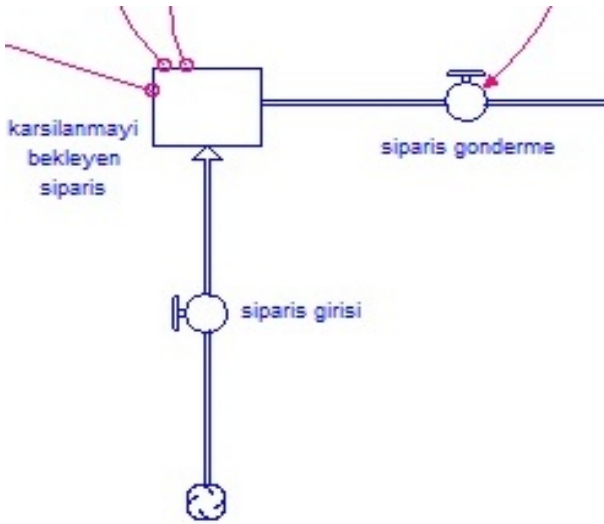
7.4. Sistem Dinamiği Modellemesi (System Dynamic Modeling)

Stella simülasyon programı ile firmanın problemi modellenip, sistem dinamiği yaklaşımıyla incelenmiştir. Belirlediğimiz ürün için kurulan model ve açıklamaları aşağıdaki gibidir:



Şekil 2. Nedensel döngü diyagramı (Casual loop diagram)

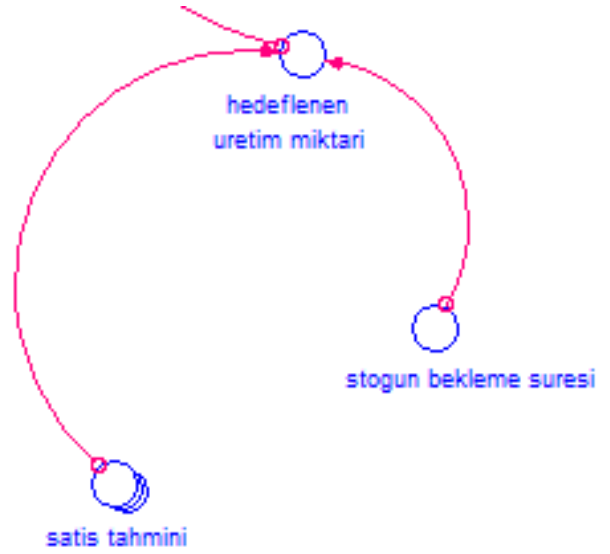
- Firma bütün planlarını aylık olarak yaptığı için simülasyon zamanı olarak da ay baz alınmıştır. Stellada zaman birimi delta time ile gösterilmektedir.
- Model sipariş girişi ile başlamaktadır (Şekil 3). Modele girilen talepler sipariş girişine aktarılır, oradan karşılanmayı bekleyen siparişler stoğuna atılarak müşteriye gönderimi yapılır. Müşteri talebine talep miktarları normal dağılıma göre yazılmıştır.



Şekil 3. Modeldeki Müşteri Taleplerinin Gerçekleştiği Bölüm (At model customer demands taken placed part)

- Satış tahminleri, converterin içine her ay için 2014 yılının aylık değerleri olarak yazılmıştır (Şekil 4).
- Stok bekleme süresi ile modelde farklı gün sayıları girişleri denemesiyle en düşük stok gün sayısı elde edilmeye çalışılmıştır.
- Hedeflenen üretim miktarı firmanın ayda 26 gün çalıştığı göz önünde bulundurularak IF döngüsü bir formül ile belirlenmiştir.
- Bitmiş ürün stoğu ilk anda hiç stok yokmuş gibi kabul edilerek başlangıç değeri 0 (sıfır) alınmıştır.
- Satılmayı bekleyen ürün miktarı, bitmiş ürün stoğunda bekleyecek olan stokları ifade etmektedir. Satılmayı bekleyen ürün miktarı; bitmiş ürün stoğu ile karşılanmayı bekleyen siparişin farkına eşittir.
- Gerçek stok, satılmayı bekleyen stok negatif değere düşmeyeceğinden oluşan negatif değerlerin takibini yapabilmemiz için

oluşturulan converterdir. Modelde bu stoğun ay sonlarında negatif değerler almaması için çalışma yapılmıştır. Böylelikle en düşük stok bekleme süresi belirlenmiştir.

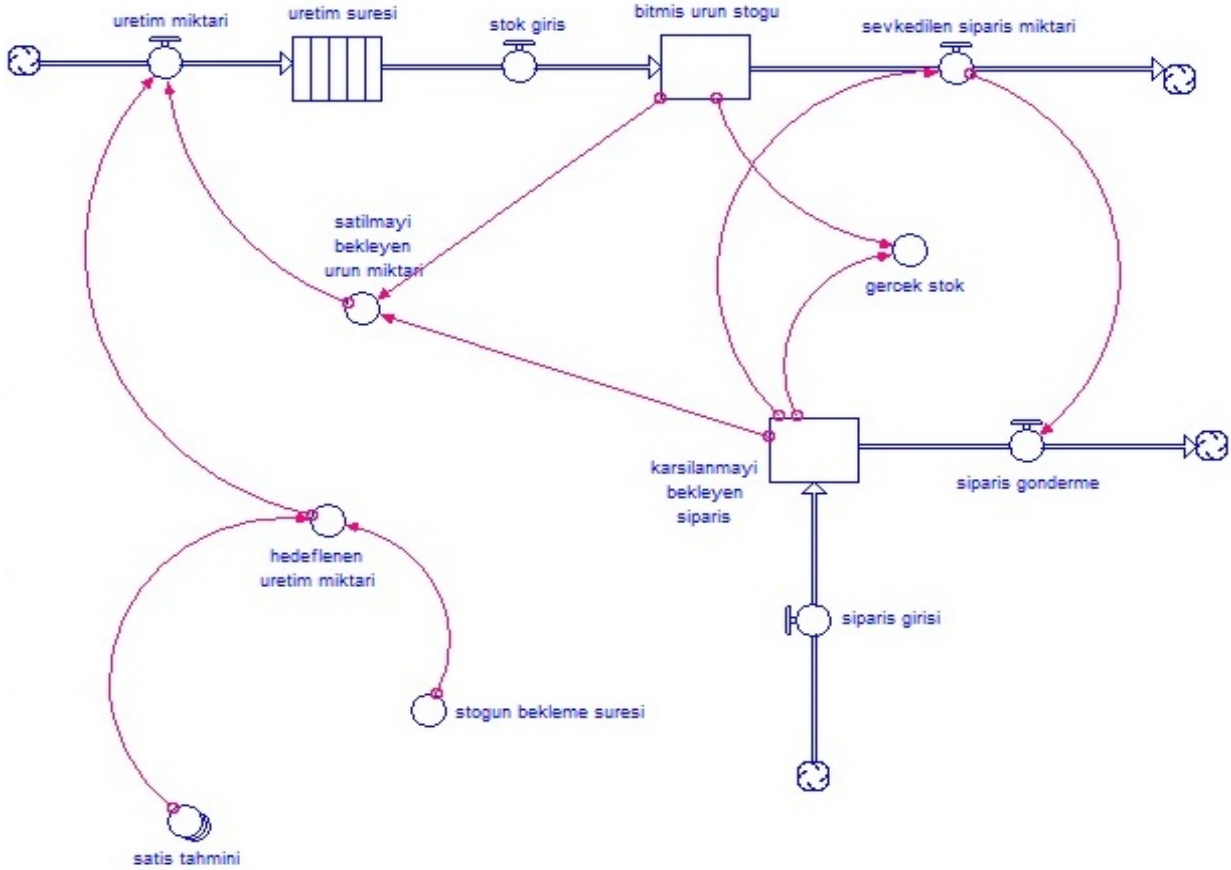


Şekil 4. Modeldeki Satış Tahminlerinin Belirlendiği Bölüm (At model sales forecasts determined part)

- Üretim miktarı, modelde yazılan formül ile oluşturulan hedeflenen üretim miktarı ve satılmayı bekleyen ürün miktarının farkına eşit olan değeri almaktadır. Böylece stokta bulunan ürünler hedeflenen üretim miktarından düşülerek asıl üretilmesi gereken değer elde edilmiş olur.
- Üretim süresi, üretim için geçen süreyi ifade eder. Bu değer bulunurken şu yöntem kullanılmıştır. Seçilen ürünün üretilme süresi 3 gündür, firma ayda 26 gün çalışmaktadır. Böylece üretim süresi $3/26 = 0.115$ ay olarak belirlenmiştir. Modelin

Stellada geliştirilen genel bir görünümü Şekil 5'de verilmektedir. Modelde geçmiş 12 aylık olarak tanımlanan satış değerlerine göre üretim miktarının belirlenmesi, her ay için gelen müşteri talepleri doğrultusunda, taleplerin müşteriye sevkiyatı, üretilen ürünlerin stokta saklanması, karşılanmayı bekleyen sipariş stokları, satılmayı bekleyen ürün miktarı ve gerçek stok gibi kavramlar ele alınarak bir tekstil firmasındaki sistem simüle edilmiştir (Şekil 6).

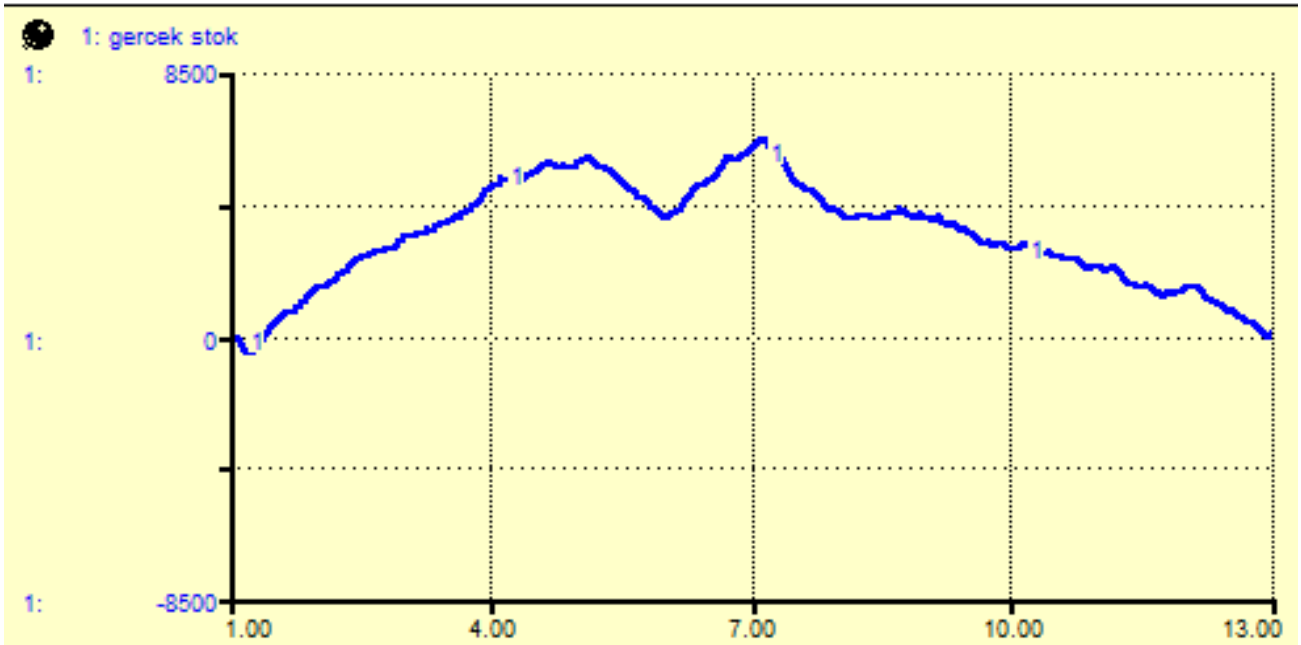
. Çil ve di ./Bir tekstil firmasında satı tahminleri
üzerinden emniyet sto u gün sayısının sistem dinami i yakla ımıyla belirlenmesi



Şekil 5. Modelin Genel Görünümü (Overview of the model)

Months	gerçek stok	satılmayı bek	sevkedilen sı	siparis girişi	bitmiş ürün s	stok girişi	karsılanmayı	siparis gonde
Jan: Initial	0.00	0.00			0.00		0.00	
Jan	1.639.45	1.639.45	3.488.15	7.296.46	5.246.61	7.263.68	3.607.16	3.488.15
Feb	3.314.15	3.314.15	4.757.32	5.966.89	8.109.27	6.483.56	4.795.12	4.757.32
Mar	4.980.93	4.980.93	4.898.37	3.759.29	9.843.71	6.093.65	4.862.78	4.898.37
Apr	5.792.91	5.792.91	5.470.15	4.323.32	11.227.22	6.519.69	5.434.31	5.470.15
May	3.929.11	3.929.11	5.815.55	2.741.44	9.648.59	4.565.08	5.719.48	5.815.55
Jun	6.234.56	6.234.56	5.351.79	5.997.93	11.606.54	6.834.29	5.371.98	5.351.79
July	3.941.72	3.941.72	5.614.29	8.677.94	9.651.75	4.344.46	5.710.03	5.614.29
Aug	3.849.36	3.849.36	5.181.23	6.302.05	9.065.61	4.873.27	5.216.25	5.181.23
Sep	2.878.14	2.878.14	5.277.86	3.698.06	8.106.63	4.581.15	5.228.49	5.277.86
Oct	2.298.19	2.298.19	4.887.30	3.835.34	7.152.62	4.343.27	4.854.42	4.887.30
Nov	1.637.39	1.637.39	5.290.18	2.369.14	6.836.29	5.372.32	5.198.89	5.290.18
Dec	130.19	130.19	5.466.03	3.388.26	5.531.30	4.524.68	5.401.10	5.466.03

Şekil 6. 9 günlük stok bekleme süresine göre aylık sipariş girişi, karşılanmayı bekleyen sipariş, sevkedilen sipariş miktarı ve gerçek stok değerleri (According to the 9 daily stock of standby time, monthly order entry, pending orders, the amount of shipped orders and actual stock)



Şekil 7. Sevkedilen sipariş miktarı ve sipariş girişinin aylara göre grafiği (The amount of shipped orders and order entry's graph by month)

Modelde müşteri taleplerinin yapılan incelemeler sonucu normal dağılıma uyabileceği düşünülmüştür. Simülasyon çalıştırılırken makine arızalanma süreleri, otonom bakım süreleri ve başlangıç ve dönem sonu stoklarının olmadığı varsayılmıştır. Farklı stok gün sayıları için model çalıştırılıp, minimum emniyet stoğu gün sayısı aylık oluşan taleplerin yine ay içinde karşılanması gerçekleştirilerek, bir sonraki ayın talebi için kaç günlük ürün miktarını bir önceki ayda üretmesi gerektiği belirlenmiştir. Ürününüz için bu değer 9 gün olarak bulunmuştur. Farklı deneme sonucunda en iyi elde edilen stok gün sayısı için incelenen ürünün sonuçları Şekil 7’de görüldüğü gibidir.

8. SONUÇ (CONCLUSION)

Günümüzde gelişen teknolojiyle birlikte firmalar artık geleneksel üretim yöntemlerinden vazgeçerek rekabet ortamından silinmemek için kendilerini geliştirici faaliyetler yapmaktadırlar. Geçmişte taleplerin çok fazla olduğu dönemlerde talebi karşılayacak arz değerleri yeterli değildi. Ürünlerin piyasa fiyatlarını bu nedenden dolayı firma sahipleri belirlemekteydi. Talep çok fazla olduğu için üretilen ürünlerin kalitesi de bir önem teşkil etmemekteydi. Firmalar her şekilde ürünlerinin satışlarını karlı bir biçimde gerçekleştirebilmekteydi. Fakat günümüzde ürünlerin fiyatlarını arzların artmasından dolayı piyasa belirlemektedir.

Bu yüzden firmalar üretim maliyetlerini azaltmazlarsa karlılıklarını arttıramamaktadırlar. Tüketici toplumun bilinçlenip seçici olmasıyla birlikte müşteri memnuniyetleri de firmalar için ayakta kalmalarını sağlayacak en büyük etkenlerden biri olmaktadır.

Firmalar müşteri memnuniyetlerini artırıcı, üretim maliyetlerini düşürücü çalışmalar yaparak piyasadaki varlıklarını korumaya çalışmaktadırlar. Bunun için kalite standartlarını yükseltip, imalat ortamlarını güvenilir hale getirerek ve en başta stok olmak üzere ihtiyaç fazlalarına para bağlamayarak ayakta durmaya çalışmaktadırlar. Üretilen ürünün satılması ve ihtiyaç fazlasının üretilmemesi yani fazla stok bulundurulmaması tüm işletmeler tarafından günümüzde bir amaç olarak belirlenmiştir.

Sistem dinamiği yıllardır araştırma yapılan temel bir konu olmasına rağmen, daha çok nüfus dinamikleri ve makroekonomik konular üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu makalede gerçekleştirilen çalışma ile günümüzün stok yönetimiyle ilgili var olan işletme sorunlarına çözüm sağlamada hem uygulama alanına yönelik hem de literatüre önemli katkı sağlanacaktır.

Bu çalışmada bir tekstil firmasının ürettiği bir ürünü için stok politikasının nasıl olduğunun analizi yapılmıştır. Öncelikle nedensel döngü diyagramıyla mevcut sistemi incelenmiştir. Firmanın on iki aylık geçmiş verilerinden

yararlanılarak sistem dinamiği modellenmesi STELLA programıyla mevcut durum simüle edilmiştir. Buradaki amaç, talepleri en iyi şekilde karşılayıp gerçek stok miktarlarını ay sonlarında negatife düşürmeden; yani aylık gelen talepleri yine o ay içinde karşılayacak şekilde, bir sonraki ay için üretilecek emniyet stoğunun gün sayısını belirlemek ve sevkiyatı gerçekleştirilen ürün miktarlarını kontrol altında tutabilmektir. Özetle 2014 yılında gerçekleşen satış miktarları üzerinden bir sonraki ayın talebini zamanında karşılayabilmek için üretilecek emniyet stok gün sayısının ne kadar olacağı öngörülme çalışılmaktadır. Stok devir hızı formülasyonu ile mevcut durumun emniyet stok gün sayısı belirlenmiştir. Yapılan matematiksel hesaplamalar sonucu stok gün sayısının 7 gün olduğu tespit edilmiştir. Ardından model farklı emniyet stok gün sayıları temel alınarak çalıştırılmış ve gerçek stok değerleri incelenmiştir. Gerçek stok değerleri incelenirken aylık müşteri taleplerinin yine o ay içinde karşılanması kural olarak belirlenmiştir. Bu değişimin takibi de gerçek stok değerinin ay sonlarında negatife düşmemesiyle gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda emniyet stoğu bekleme gün sayısının 9 gün olduğuna karar verilmiştir. Böylece firma incelenen ürün için bir sonraki ayın satış miktarının 9 günlük ihtiyacını bir önceki ayda ürettiği zaman stokta bekleme süresini minimum sağlayacak şekilde üretim gerçekleştirebilecektir. Firma stoğunda fazla miktarda ürün bulundurmamaya gereksiz stok maliyetlerine katlanmamış olacaktır. Bu çalışmada önceki dönemlerde gerçekleşen satış verilerine dayalı olarak tahmin yapılmakta ve bu doğrultuda öngörüler yapılmaktadır. Bu yönüyle bu bir kısıt olabilir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlardan hareketle yapılacak çalışmalarda, çekme sistemine dayalı, doğrudan müşteri talebi doğrultusunda üretim durumunda stok bekleme gün sayısını daha kısa sürelerde sağlayacak dinamik benzetim çalışması yapılarak stok yönetimine bir katkı sağlanabilir. Ayrıca Benzer yönetim sorunları diğer sektörler için geçerli olduğu için diğer sektörler içinde benzer çalışmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] P. Zipkin, Foundations of Inventory Management, USA: McGraw-Hill. Max Taylor, 2000.
- [2] I. Cil ve Y. S. Turkan, «An ANP - based assessment model for lean enterprise transformation,» *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, cilt 64, no. 1, pp. 1113-1130, 2013.
- [3] M. Feng, C. Li, S. McVay ve H. Skaife, «"Does ineffective internal control over financial reporting affect a firm's operations? Evidence from firms' inventory management.",» *The Accounting Review*, cilt 90, no. 2, pp. 529-557., 2014.
- [4] S. BinSyed, N. N. Mohamad, N. A. Rahman ve R. D. Suhaimi, «A Study on Relationship between Inventory Management and Company Performance: A Case Study of Textile Chain Store,» *Journal of Advanced Management Science*, cilt 4, no. 4, pp. 1-2, 2016.
- [5] K. Mulinski ve W. Sachs, «Virtual supply chains and their enemies: from static object architecture to dynamic regulation,» *Supply Chain Forum: An International Journal*, cilt 10, no. 1, pp. 62-76, 2009.
- [6] Z. Verwater-Lukszo ve T. Christina, «System Dynamics modeling to improve complex inventory management in a batch-wise plant,» %1 içinde *Proceedings of the 15th European Symposium on Computer-Aided Process Engineering*, Barcelona, Spain, 2005.
- [7] M. Shafi, «Management of inventories in textile industry: A cross country research review,» *Singaporean Journal of Business Economies and Management Studies*, vol. 2, no. 7, pp. 2014., cilt 2, no. 7, pp. -, 2014.
- [8] J. W. Forrester, *Industrial dynamics*, Cambridge: MIT Press, 1961.
- [9] J. Sterman, *Business Dynamics: systems thinking and modeling a complex world*, Worldwide: McGraw-Hill, 2000.
- [10] F. Campuzano ve J. Mula, *Supply Chain Simulation: A System Dynamics Approach for Improving Performance*, London : Springer-Verlag Limited, 2011.
- [11] E. Diehl ve J. Sterman, «Effects of feedback complexity on dynamic decision making,» *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, cilt 62, no. 2, p. 198–215, 1995.
- [12] B. Snabe ve A. Größler, «System dynamics modelling for strategy implementation-case study and issues,» *Systems Research and*

- Behavioral Science*, cilt 23, no. 4, p. 467–481, 2006.,
- [13] E. Suryani, S. Y. Chou, R. Hartono ve C. H. Chen, «Demand scenario analysis and planned capacity expansion: A system dynamics framework,» *Simulation Modelling Practice and Theory*, cilt 18, no. 6, p. 732–751, 2010.
- [14] N. M. Rashid, F. Ngalawa ve I. Cil, «Comparative Study of Logistic Industry of Tanzania and Turkey,» *International Journal of Operations and Logistics Management*, cilt 5, no. 2, pp. 74-82, 2016.
- [15] J. B. Homer ve C. L. StClair, «A Model of HIV Transmission through Needle Sharing. A model useful in analyzing public policies, such as a needle cleaning campaign,» *Interfaces*, cilt 21, no. 3, pp. 26-29, 1991.
- [16] G. Hirsch, J. Homer, E. Evans ve A. Zielinski, «A System Dynamics Model for Planning Cardiovascular Disease Interventions,» *American Journal of Public Health*, cilt 100, no. 4, p. 616–622, 2010.
- [17] K. Vogstad, «Combining System Dynamics and Experimental Economics to Analyse the Design of Tradable Green Certificates,» %1 içinde *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE, Hawaii* , 2005.
- [18] M. Dill, «Capital Investment Cycles: A System Dynamics Modelling Approach to Social Theory Developmen,» %1 içinde *15th International System Dynamics Conference: Systems Approach to Learning and Education into the 21st Century*, Istanbul, Turkey,, 1997.
- [19] D. Towill, «Industrial dynamics modelling of supply chains,» *Logistics Information Managment*, cilt 9, no. 4, pp. 43-56, 1996.
- [20] H. T. Lee ve J. C. Wu, «A study on inventory replenishment policies in a two-echelon supply chain system,» *Computer & Industrial Engineering*, cilt 51, no. -, pp. 257-263, 2006.
- [21] H. I. Demir, O. Uygun, I. Cil, M. Ipek ve M. Sari, «Process planning and scheduling with SLK due-date assignment where earliness, tardiness and due-dates are punished,» *Journal of Industrial and Intelligent Information* , cilt 3, no. 3, pp. -, 2015.
- [22] M. Schwaninger ve P. Vrhovec, «Supply System Dynamics: Distributed Control in Supply Chains and Networks,» *Cybernetics and Systems*, cilt 37, no. 5, p. 375–415, 2006.
- [23] I. Cil, O. Kurtcu, H. I. Demir, F. Yener, Y. S. Turkan, M. Unver ve R. Evren, «Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Determination of Supply Chain Performance Evaluation Criteria,» *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index, Industrial and Manufacturing Engineering*, 11(9), 1281, cilt 11, no. 9, pp. 1281-, 2017.
- [24] İ. Çil, «Bilgi Tabanlı İmalat Karar Destek Sistemleri ve Bir Uygulama,» *Endüstri Mühendisliği*, cilt 1, no. 1, pp. 15-27, 2002.
- [25] E. Zwicker, «System Dynamics in Inventory and Production Planning An Introduction and Critical Overview,» *OR Spektrum*, cilt 1, no. 143, pp. -, 1980.
- [26] I. Cil, N. O. Erdil, T. Kılıc ve B. Kosar, «Lean Logistic Network Design And Analysis With Anylogic,» %1 içinde *XIV. International Logistics And Supply Chain Congress*, Izmir, 2016.
- [27] R. Abbou, C. Moussaoui ve J. J. Loiseau, «Effects of inventory control on bullwhip in logistic systems under demand and lead time uncertainties,» *IFAC-PapersOnLine*, cilt 48, no. 3, pp. 266-271, 2015.
- [28] H. Dai, J. Li, N. Yan ve W. Zhou, «Bullwhip effect and supply chain costs with low-and high-quality information on inventory shrinkage.,» *European Journal of Operational Research* , cilt 250, no. 2, pp. 457-469, 2016.
- [29] K. Jeong ve B, Analysis of bullwhip effect using the systems dynamics simulation, Houston: University of Houston and South Carolina State University,, 2015, pp. 1-9.
- [30] H. Yasarcan ve Y. Barlas, «A generalized stock control formulation for stock management problems involving composite delays and secondary stocks,» *System dynamics review* , cilt 21, no. 1, p. 3, 2005.
- [31] İ. Çil ve S. Yalçın, «Yalın Üretimin Bankacılık Sektörüne Uyarlanması ve Bir Benzetim Çalışması,» *Sakarya University Journal of Science*, cilt 22, no. 2, pp. 624-638, 2018.

- [32] I. Cil, «Internet-based CDSS for modern manufacturing processes selection and justification,» *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, cilt 20, no. 3, pp. 177-190.
- [33] J. D. Sterman, J. W. Forrester, A. K. Graham ve P. M. Senge, «An Integrated Approach to the Economic Long Wave. Paper read at Long Waves, Depression, Innovation,» -, Siena-Florence, Italy, 1983.
- [34] Y. Barlas, *System Dynamics: Systemic Feedback Modeling for Policy Analysis in Knowledge for Sustainable Development*, Paris: Oxford,, 2002.
- [35] T. Çakar ve I. Cil, «Artificial neural networks for design of manufacturing systems and selection of priority rules,» *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*,, cilt 17, no. 3, p. 195–211, 2004.
- [36] I. Cil ve R. Evren, «Linking of manufacturing strategy, market requirements and manufacturing attributes in technology choice: an expert system approach,» *The engineering economist*, cilt 43, no. 3, pp. 183-202, 1998.
- [37] «Stella Software,,» Çevrimiçi Available: [http://www.iseesystems.com/software/Ed ucation/StellaSoftware.aspx,,](http://www.iseesystems.com/software/Education/StellaSoftware.aspx,,) -, 2017.

	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://www.saujs.sakarya.edu.tr		
	<u>Gelis/Received</u> 31.09.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 12.04.2018	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder348185	

Diş protez laboratuvarları ortam havasındaki partikül madde kirliliğinin çalışan sağlığı yönünden değerlendirilmesi

Serap Aarsal Yıldırım, Beyhan Pekey

ÖZ

Bu çalışmada, Kocaeli’de seçilen 6 farklı diş protez laboratuvarında, diş protezi üretimi sürecinde ortaya çıkan partikül maddeye bağlı, çalışma ortam havasının kirlilik düzeyinin ve bu kirliliğin hangi sağlık şikayetlerine neden olabileceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Diş protez laboratuvarlarında işlem yapılan ünitelerde en yaygın hangi boyut aralığındaki partiküllerin görüldüğü ve bu partikül boyutlarıyla çalışanların sağlık şikayetleri arasında bir ilgi olup olmadığı çalışılmıştır. Bu amaçla çalışma kapsamındaki tüm diş protez laboratuvarlarından en az 3’er örnek alınarak partikül madde örneklemeleri gerçekleştirilmiştir. Örnekler 5 aşamalı Sioutas sıralı örnekleyiciler kullanılarak toplanmış, gravimetrik ölçümlerden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. En düşük PM_{2,5} konsantrasyonu, havalandırma sistemi en iyi olan diş protez laboratuvarında tespit edilmiştir. PM_{2,5} düzeyi ile çalışanların hırıltılı solunum ve gözde kaşıntı şikayetleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar görülmüştür.

Anahtar kelimeler: partikül madde, diş protez laboratuvarı, çalışan sağlığı

Assessment of particulate matter-related pollution in the dental prosthesis laboratory air in terms of worker’s health

ABSTRACT

The aim of this study was to determine air pollution in a work environment related to particulate matter that arises during dental prosthesis production in 6 dental prosthesis laboratories in Kocaeli, and to investigate which health symptoms this pollution might cause. It is also determined the size range of the particulates that were most often observed in the units where the production was carried out. The study queried whether the symptoms of persons working in these laboratories were related to the sizes of particles. At least 3 samples were taken from each laboratory. The samples were collected using a 5-stage Sioutas Cascade Impactor; the results were assessed through gravimetric measurements. The lowest PM_{2,5} concentration was found in the dental prosthesis laboratory that had the best ventilation system. The results showed statistically significant differences between the level of PM_{2,5} and workers’ symptoms, such as noisy breathing and itchy eyes.

Keywords: particulate matter, dental prosthesis laboratory, worker’s health

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Akciğerler, burun, göz ve deri gibi organlardan sonra çevresel maruziyetin ilk etkilediği organdır. Yetişkin bir insan günde yaklaşık 10 m³ hava solumakta ve bu solunumla alınan havanın içeriği insan sağlığını etkilemektedir.

Havanın içeriğine bağlı olarak gelişebilecek hava kirliliği sadece dış ortamı ilgilendiren bir konu olmamakla birlikte, US EPA kişinin yaşadığı iç ortamdaki hava kirliliğinin dış ortam hava kirliliğinden bazen 2-5 kat, hatta bazı çalışma ortamlarında 100 kat daha fazla olabileceğini bildirmiştir [1]. Genel olarak kentte yaşayan insanların 8-10 saatlerini iş yerinde çalışarak geçirdikleri düşünüldüğünde iş yerindeki iç ortam hava kalitesinin sağlık üzerinde önemli etkileri olabileceği söylenebilir [2]. İşin çalışan sağlığına etkisi iş kazası, meslek hastalığı ya da meslekle ilgili hastalıklar şeklinde görülmektedir [3]. Çalışma ortamındaki partikül madde yoğunluğu görmeyi engelleyerek iş kazasına sebep olabileceği gibi, özellikle solunum yoluyla çalışanın vücuduna alınıp, birikerek mesleki hastalıklara sebep olmaktadır [4].

İşe bağlı ölümlerden mesleki kanserler %32 oran ile birinci sırada sorumlu tutulmaktadır [3]. Dünya Sağlık Örgütü (DSÖ) tarafından yapılan 2014 tarihli Dünya Kanser Raporunda iç ve dış ortam hava kirliliğinin içeriği dikkate alınmadan, doğrudan akciğer kanserine neden olduğu bildirilmiştir [5]. 2010 yılında DSÖ tarafından gerçekleştirilen Küresel Hastalık Yükü çalışmasında ise, işe bağlı ölüme neden olabilecek riskler içerisinde, yaralanmalardan sonra, ortam havasındaki partikül madde (PM)'ler, gaz ve dumanın 2. sırada riskli olduğu açıklanmıştır [6].

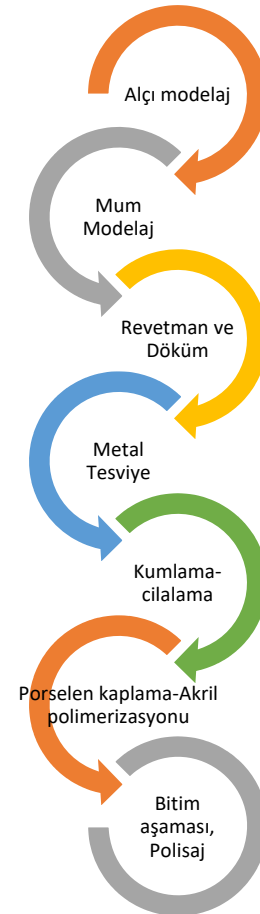
Çalışma ortamındaki hava kalitesi üzerinde, yapılan işin özelliği büyük önem taşımaktadır. Kayıp dişlerin yerine protezinin yapılması, ortodontik apareyler hazırlanması ve tamirleri işlerinin gerçekleştirildiği diş protez laboratuvarları, yapılan işin incelikli ve aşındırma merkezli olması nedeniyle partikül maddelerin ortam havasında yoğun olarak bulunduğu sektörler içerisinde yer almaktadır [7]. Ülkemizde diş protez teknisyenliği, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İşyeri Tehlike Sınıflaması listesinde az tehlikeli, tehlikeli ve çok tehlikeli olarak yapılan sınıflandırmada, madencilik sektörüyle aynı

kategoride yani “çok tehlikeli işler” sınıfında yer almaktadır [8].

Bu çalışmanın amacı, Diş Protez Laboratuvarları (DPL)'nda yapılan işlemler sırasında ortaya çıkabilecek farklı boyut aralıklarındaki partikül madde kütleli konsantrasyonlarının belirlenmesi ve çalışan sağlığı yönünden değerlendirilmesidir.

1.1. Diş Protez Laboratuvarı Çalışma Sistemi (Operating Procedures in the Dental Prosthesis Laboratory)

El emeğiyle çalışılan, otomatik üretimin az olduğu bu sektör çalışanları, genellikle genç yaşta çalışma hayatına atılmakta, küçük odalarda yoğun tempoyla çalışmaktadırlar [9, 10]. Bu çalışanlar üretim sürecinde aşındırma işlemi kapsamında gerçekleştirilen temizleme, cilalama ve parlatma prosesleri sırasında çok çeşitli metaller ve kimyasallar kullanılmaktadırlar [11].



Şekil 1. Diş Protez Laboratuvarlarındaki proses akım şeması (Process Flow Diagram in Dental Prosthesis Laboratories)

Diş protez laboratuvarlarındaki çalışma sistemi, proses akım şeması oluşturularak Şekil 1’de

gösterilmiştir. Diş hekimince alınan kalıbın modelinin çıkarıldığı alçı dökümü ile protez işleri başlamaktadır Alçı ile ağzın ve dişlerin kalıbı çıkarıldıktan sonra, eksik olan dişler için mum modeller yapılmaktadır. Mum modellerin alçı ile tekrar kalıbı oluşturulmakta (revetman), daha sonra alçı içindeki mumun içi yüksek sıcaklıkta metalle doldurulup, mum buharlaştırılarak kron adı verilen ham protez dişler hazırlanmaktadır. Bu ham protez kuşlanarak temizlendikten sonra, tesviye denilen ince testerelerde yontularak protez diş haline getirilmektedir. Freze ve tekrar kuşlama işlemleriyle tam temizliği sağlanmakta en son polisaj işlemiyle cilalanıp pürüzsüz hale getirilmektedir. Bu pürüzsüzleştirme işlerinde alüminyum oksit, elmas, silisyum karbür, kuvars parçacıkları kullanılmaktadır [12]. Temiz hale getirilen kronun üzeri porselenle kaplandıktan sonra fırınlanmaktadır. Pişen porselenin üzeri diş hekiminin belirlediği renge boyanmaktadır. Sonrasında protez, tekrar pürüzsüzleştirme ve parlatma işlemlerinden geçip diş hekimine ulaştırılmaktadır [9]. Tam ya da kısmi hareketli protezlerde, yapılan protez dişler ya da hazır dişler, diş eti gibi görünen akril maddenin üzerine dizilmektedir.

Bu işlemler sırasında DPL çalışanları mesleki anlamda özellikle kuşlama ve polisaj işlemleri sırasında, içerisinde krom, kobalt, molibden, berilyum, nikel ve küçük miktarlarda galyum, rutenyum veya alüminyum gibi metal alaşımları, silika partikülleri, metilmetakrilat gibi çeşitli kimyasalların da olduğu ince partiküllere maruz kalmaktadırlar [5]. Ayrıca, mum modelaj sırasında mumun yakılmasına bağlı olarak ultra ince partiküllere maruz kalabilmektedirler. Porselen ve metal alaşımların tesviye ve parlatma (polisaj) aşamalarında oluşan partikül maddelerin solunmasına bağlı olarak solunum yolu ve akciğer hastalıkları [13, 14], akril ve metallere temas sonucu kontak dermatit [15, 16] ve diş eti görünümünü veren akrilin polimerizasyonu sırasında içerisinde bulunan metilmetakrilatın solunmasına bağlı koku alma bozuklukları gelişebilmektedir. Ayrıca, çalışma ortamı havasında partiküllere bağlı olarak bulunan kadmiyuma solunum yoluyla maruziyet sonucu kanserler ya da nöropatilere bağlı hastalıklar, krom, kobalt ve nikelin solunmasına bağlı lenfositlerde genotoksik hasarlar da görülmektedir [10, 11]. Yine bu çalışanlarda tesviye sırasında kullanılan motorların titreşim etkisi ve uzun çalışma saatleri meslek hastalıklarına neden olmaktadır [10, 17, 18]. Kuşlama aşamasında

ortam havasına karışan silika partiküllerine bağlı olarak silikozis, sistemik lupus eritematozus (SLE), romatoid artrit, renal bozukluklar ve immun sistem anomalileri görülebilmektedir. Kot kuşlama işçilerinden sonra silikozisin en yaygın görüldüğü meslek grubunun diş protez teknisyenleri olduğuna dair yapılan çalışmalar mevcuttur [19]. Ülkemizde 2011 yılı SGK verilerine göre 4 diş teknisyeni meslek hastalığı nedeniyle yaşamını yitirmiştir [20].

1.2. Partikül Madde Oluşumu ve Sağlık Üzerine Etkileri (Particulate Matter Formation and Its Effects on Health)

İç ortam hava kalitesinin bozulmasına sebep olan faktörler kimyasal ajanlar, kimyasalların buharları ya da farklı boyut aralıklarındaki partiküllerdir. Solunum havası içerisindeki partikül maddeler kaba, ince ve ultra ince şeklinde sınıflandırılmaktadır [21]. Kaba partiküller (>2,5 µm) daha çok mekanik süreçler sonucu oluşurken, ince partiküller (<2,5 µm, PM_{2,5}) ve çok ince partiküller (<0,1 µm) yanma gibi reaksiyonlar sonucu oluşmaktadır [22]. Solunabilir kütle fraksiyonunu 10 µm'nin altındaki partiküller (PM₁₀) oluşturmakta ve bunun 5 µm'dan büyük boyutta olan kısmı burun, farenks ve larenkste tutulmaktadır. 5 ile 1 µm arasındaki partiküller ise trakea bronş ve bronşiallerde tutulurken 1 µm'dan küçük partiküller alveollere ulaşabilmektedir [23]. Ultra ince partiküller ise dolaşıma ve hücrelere kadar erişebilmektedir. Partikül maddelerin inhale edilebilme olasılıkları, partikül boyutuna, ortamdaki hava hareketliliğine ve çalışanın solunum hızına göre değişmektedir [24]. Solunan partiküller, çalışanın fizyolojik özelliklerine ya da partikülün özelliklerine bağlı olarak vücutta birikebilir ya da nefes verme sırasında dışarı atılabilirler [23].

Buna göre 0,5-7 µm boyutundaki partiküllerin %25'i, 0,5 µm'dan küçük olan partiküllerin ise %20'si alveollerde birikebilmektedir [23]. Alveollerde biriken partiküller makrofaj hücreleri tarafından tutularak %7-10'luk kısmı lenf nodlarına taşınır. Lenf nodlarında makrofajlar parçalanabilir. Bu parçalanma sonucu oluşan enzim ve oksidanlar ise respiratuar bronşiolün epitelinde harabiyete, fibrozise neden olmaktadır. Bu arada refleks cevap olarak artan mukus solunum yollarının daralmasını arttırmaktadır. 0,1 µm'un altındaki partiküller alveollerden kapillere diffüze olarak dolaşıma katılırlar. Partikül maddelerin çapı gibi fiziksel özelliklerinin yanı

sıra elementel kompozisyonları da sağlığı verdikleri zarar açısından önem taşımaktadır [25, 26].

Belirli seviyelerde ince parçacıklara (PM_{2,5}) uzun süre maruz kalmak, kronik bronşit ve amfizem, yani KOAH'a yol açabileceği gibi partikül maddelerin sürekli olarak akciğerde birikmesi de akciğer doku reaksiyonu olan pnömokonyozlara neden olmaktadır. Mesleki partikül madde maruziyetine bağlı olarak DPL çalışanlarında pnömokonyozlar %4,5-43 arasında bir yaygınlıkta görülmektedir [27, 28].

Yapılan çalışmalarda, özellikle ince ve çok ince partikül maddelerin, solunum sistemi hastalıkları dışında myokard infarktüsü, aritmi, kalp yetmezliğinin alevlenmesi ve inme gibi problemlere neden olduğu gösterilmiştir [29, 30]. Hava kirliliği ilişkili kardiyovasküler hastalıklar inflamasyon mekanizmasıyla açıklanmaktadır. Nitekim kısa süreli PM maruziyetinin özellikle riskli popülasyonda kardiyovasküler mortaliteyi artırırken uzun süreli maruziyet aterosklerozun başlangıç nedeni olarak karşımıza çıkabilmektedir [30]. Kronik PM_{2,5} maruziyetinin vücutta enflamasyon davranışını artırarak damar endotelinde yıkımı artırdığını, arteriosklerotik hipertansiyon ve Tip 2 Diabetes Mellitus'un başlangıcına ve ilerlemesine katkıda bulunduğunu pek çok araştırma göstermektedir. Akut ya da kısa dönem PM_{2,5} maruziyeti arterioskleroz (damar sertliği) öyküsü olan hastalarda iskemik inme (pıhtı atma, felç) ve kalp krizi riskinde artışa sebep olarak günlük ölüm oranlarının artmasına sebep olabilmektedir [30-33].

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHODS)

2.1. Örneklem noktaları (Sampling points)

Bu çalışma Kocaeli İl Sağlık Müdürlüğüne kayıtlı 14 özel diş protez laboratuvarı içerisinde, çalışan sayısının 3'ün üzerinde olduğu ve örnek toplama işlemini kabul eden Gebze ve İzmit ilçelerindeki 6 farklı laboratuvarında 1-30 Mart 2017 tarihleri arasında, çalışma ortamı havasında ölçümler yapılarak gerçekleştirilmiştir. Örneklerin alındığı DPL'nin özellikleri hakkındaki bilgiler, Taner (2012) tarafından hazırlanan anket formunun bu çalışma için uyarlanarak kullanılması sonucunda elde edilmiştir ve Tablo 1'de sunulmuştur.

DPL'de çalışanların demografik özellikleri, işyerindeki maruziyetleri, kullandıkları kişisel koruyucu donanım (KKD) ları belirlemek için kullanılan bir diğer anket formu ise Türk Toraks Derneği Çevresel ve Mesleki Akciğer Hastalıkları Değerlendirme Formundan uyarlanarak kullanılmıştır [32, 33]. Anket formları 7 kadın, 43 erkek olmak üzere 50 DPL çalışanına yüz yüze görüşerek uygulanmıştır. Bu çalışma için Kocaeli Üniversitesi etik kurulundan onay alınmıştır.

Çalışma kapsamında seçilen tüm diş protez laboratuvarları, diş protez ve ortodontik apereylerin de yapılabildiği "çok amaçlı" laboratuvarlardır. Ölçüm yapılan laboratuvarların biri dışında (5 nolu DPL) iş sirkülasyonu ve çalışan sayısı birbirine yakındır. 1 nolu DPL'de işlerin yapıldığı yere göre oda ayrımı sadece Porselen ve diğer işlemler şeklindeyken, diğer laboratuvarlarda Porselen, Kumlama, Metal tesviye, Mum modelaj, Alçı odaları birbirinden ayrı odalar şeklindedir. Tüm DPL'lerde kronun döküldüğü (metal döküm) oda ayrıdır. 5 ve 6 nolu DPL'de Kumlama odası balkonun kısmi kapatılmasıyla yapılmış, yarı kapalı bir ortamdır.

2.2. Örnekleyicilerin Hazırlanması (Sample Preparation)

Partikül maddelerin toplanması için Sioutas sıralı örnekleyici ve Leland Legacy pompa kullanılmıştır. Pompanın kalibrasyonu BIOS DryCal DC-2 model kalibratör yapılmış ve pompanın akış hızı 9 L/dk olarak ayarlanmıştır. Partiküller, gözenek boyutu 2,0 µm olan 37 mm çaplı ve gözenek boyutu 0,5 µm olan 25 mm çaplı 2 farklı boyutta teflon (PTFE-politetrafluoroetilen) filtreler üzerine toplanmıştır. Bu işlem için filtreler, örnekleme öncesinde, 19 ± 1°C sıcaklık ve % 50±5 rölatif nem şartlarındaki tartım odasında, desikatörde 24 saat bekletilmiş ve ardından Sartorius CP225D model hassas terazide tartılmıştır.

Tablo1. Örneklerin alındığı Diş Protez Laboratuvarlarının özellikleri (Characteristics of Dental Prosthesis Laboratories)

Örnekleme Bölgesi	Alan (m ²)	Tavan yüksekliği (m)	Havalandırma sistemi	Masa başı vakum var mı?	Çeker ocak / Çalışma Kabini var mı?	Çalışma ortamındaki diğer malzemeler	Isıtma sistemi	Zemin özelliği	Günlük yapılan protez (üye)
1. DPL	Genel ortam	110	Salyangoz tip fan	var	var/var	Bilgisayar	Doğal gaz	Laminat parke	30-40
	Metal tesviye	40				Poselen fırını			
	Kumlama	40				yok			
2. DPL	Porselen	80	Cebri havalandırma sistemi	var	var/var	Bilgisayar	Doğal gaz	Laminat parke	40-50
	Metal Tesviye + Zirkonyum	10				Bilgisayar			
	Kumlama	10				yok			
3. DPL	Porselen	12	Aspiratör	var	var/var	Bilgisayar	Doğal gaz	Ahşap parke	20-30
	Kumlama	15				Klima			
	Metal Tesviye	30				Porselen fırını			
4. DPL	Porselen	11	Aspiratör	var	var/var	Porselen	Elektrikli ısıtıcı	Laminat parke	20-30
	Kumlama	8				Elektrikli ısıtıcı			
	Mum modelaj	30				Elektrikli ısıtıcı			
5. DPL	Porselen	18	Aspiratör	var	var/var	Klima	Klima	Laminat parke	400-500
	Metal Tesviye	16				yok			
	Kumlama	12				yok			
6. DPL	Akril tesv	50	Aspiratör	var	yok/yok	Porselen	Doğal gaz	Laminat parke	60-70
	Metal Tesviye	15				Elektrikli ısıtıcı			
	Kumlama	12				Alçı malzemeler			

Bu çalışmada kullanılan 5 aşamalı (A-E) sıralı örnekleme ile 2,5µm'den büyük, 1,0-2,5 µm, 0,5-1,0 µm ve 0,25-0,50 µm boyut aralıklarındaki partiküller, sırasıyla, A, B, C ve D aşamalarında toplanırken; 0,25 µm'den küçük partiküller son aşamada (E) toplanmaktadır. A-D aşamaları için 25 mm'lik filtreler, E aşaması için ise 37 mm'lik filtreler kullanılmıştır.

Çalışma ortamı hava örneklemeleri için, örnekleme cihazları, DPL'de Kumlama, Porselen, Metal Tesviye gibi ünitelere, işlemi yapan çalışana en yakın noktaya ve bir kişinin ortalama solunum yüksekliği olan 1,5 metre yüksekliğe yerleştirilmiştir. Örneklemeler sonunda toplam 20 kaba ve 80 ince partikül madde örneği toplanmıştır.

Örnekleme işleminden sonra, filtreler tekrar Sartorius CP225D model, 0.01/0.1 mg duyarlılıkta hassas terazide tartılarak, gravimetrik yöntem ile partikül madde kütleleri belirlenmiştir.

PM_{2,5} kütlelerini hesaplamak için, sıralı örnekleme aşamalarındaki teflon filtrelerde tutulan partikül maddelerin kütleleri toplanmıştır. A aşamasında tutulan partikül maddeler, kaba partikül (PM_{>2,5}) olarak sınıflandırılmıştır.

Her bir DPL’de 8-9 saat arasında değişen sürelerde partikül madde ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Potansiyel kontaminasyonu değerlendirmek için her bir diş laboratuvarında en az 1 kez olmak üzere toplam 7 adet blank (şahit) örneği alınmıştır.

2.3. Verilerin analizi (Data analysis)

Elde edilen veriler, SPSS 16,0 programı kullanılarak analiz edilmiştir. Tanımlayıcı istatistikler, kategorik değişkenler için cross-tab, sayısal değişkenler için ortalama, standart sapma şeklinde verilmiştir. Bağımsız kategorik değişkenlerin karşılaştırılmasında Ki-kare testi kullanılmıştır. Ki-kare koşulunun sağlanmadığı durumlarda çoklu karşılaştırmalar için, sayısal değişkenlerin ikili grup karşılaştırmalarında normal dağılım koşulu sağlanmayan durumlarda Mann Whitney U, çoklu grup karşılaştırmalarında normal dağılım koşulu sağlanmayan durumlarda Kruskal Wallis test istatistiği kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Altı DPL’de 20 farklı örnekleme noktasında ölçülen partikül maddelerin kütleli konsantrasyonları Tablo 2’de verilmiştir.

Toplam partikül madde (ince+kaba partiküller) konsantrasyonları incelendiğinde en yüksek konsantrasyonun 6 nolu DPL kumlama ünitesinde olduğu (2489 µg/m³), en düşük konsantrasyonun ise 2 nolu DPL porselen ünitesinde olduğu (169 µg/m³) saptanmıştır (Tablo 2). Her bir boyut aralığı için tüm örnekleme noktalarında tespit edilen partikül madde konsantrasyonlarının genel ortalaması ve standart sapması sırasıyla; PM_{>2,5} için 326 ± 306 µg/m³, PM_{2,5-1,0} için 111 ± 77 µg/m³, PM_{0,5-1} için 53,8 ± 49 µg/m³, PM_{0,25-0,50} için 110 ± 178 µg/m³, PM_{<0,25} için 132 ± 139 µg/m³ olarak bulunmuştur.

En yüksek PM_{2,5}, PM_{1-0,5}, PM_{0,5-0,25} ve PM_{<0,25} konsantrasyonları 5 nolu DPL olarak isimlendirilen laboratuvarın kumlama ünitesinde tespit edilmiştir (sonuçlar sırayla; 1645 µg/m³, 197 µg/m³, 709 µg/m³, 485 µg/m³ şeklindedir). En yüksek PM_{2,5-1} konsantrasyonu da yine aynı laboratuvarın metal tesviye ünitesinde tespit edilmiştir (277,7 µg/m³). En düşük PM_{2,5}, PM_{2,5-1}, PM_{1-0,5}, PM_{0,5-0,25} konsantrasyonları 2 nolu DPL olarak isimlendirilen laboratuvarın porselen ünitesinde sırasıyla 80,8 µg/m³, 29,4 µg/m³, 4,90 µg/m³, 12,2 µg/m³ olarak tespit edilmiştir.

En düşük PM_{<0,25} konsantrasyonu ise aynı laboratuvarın metal tesviye ve zirkonyum protez üretimi ünitesinde 27,3 µg/m³ olarak tespit edilmiştir.

Çalışma kapsamında seçilen tüm DPL’de farklı ünitelerde yapılan örnekleme sonuçlarına göre elde edilen ortalama PM kütleli konsantrasyonları ilişkilendirildiğinde, en yüksek PM konsantrasyonlarının sırasıyla; kumlama, metal tesviye ve porselen ünitelerinde olduğu tespit edilmiştir. Her bir DPL’de bulunan farklı çalışma üniteleri, bu ünitelerde tespit edilen PM_{2,5} konsantrasyonu açısından karşılaştırıldığında porselen üniteleri ve kumlama üniteleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılık saptanmıştır. Kumlama ünitelerindeki PM_{2,5} konsantrasyonunun porselen ünitelerine göre 4-5 kat daha fazla olduğu görülmüştür (Tablo 3).

Tablo 2.Farklı boyut aralıklarındaki partikül maddelerin kütleli konsantrasyonları ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Mass concentration of particulate matters in different size ranges ($\mu\text{g}/\text{m}^3$))

Örnekleme Bölgesi	A ¹	B ²	C ³	D ⁴	E ⁵	PM _{2,5} (İnce) B+C+D+E	PM _{>2,5} (Kaba) A	Toplam PM konstr.	% PM _{2,5}	% PM _{>2,5}	
1. DPL	Genel ortam	141,4	91,15	27,31	29,58	43,30	191,1	141,4	332,5	57,49	42,51
	Metal tesviye1	276,6	136	43,03	56,63	72,54	308,2	276,6	584,8	52,70	47,30
	Kumlama	408,2	121,4	38,77	19,33	46,12	225,8	408,2	633,9	35,61	64,39
	Porselen	128,9	103	96,19	99,83	56,31	355,4	128,9	484,3	73,38	26,61
	Metal Tesviye2	102,1	97,8	133,5	97,29	60,24	388,8	102,1	490,8	79,20	20,8
2. DPL	Porselen	88,3	29,42	4,90	12,22	34,26	80,8	88,3	169,1	47,78	52,21
	Metal Tesviye + Zirkonyum	252,9	77,46	18,22	36,41	27,26	159,4	252,9	412,3	38,65	61,35
	Kumlama	353,3	82,98	23,70	37,89	80,54	225,1	353,3	578,4	38,92	61,08
3. DPL	Porselen	186,3	79,38	32,26	29,77	52,09	193,5	186,3	379,8	50,95	49,05
	Kumlama	278,7	91,32	51,25	60,17	95,82	298,6	278,7	577,3	51,72	48,28
	Metal Tesviye	155,2	47,36	26,24	35,79	76,37	185,8	155,2	341	54,48	45,52
4. DPL	Porselen	178,3	54,86	11,40	41,13	109,7	217,1	178,3	395,5	54,91	45,09
	Kumlama	181	64,16	29,76	54,98	112,3	261,2	181	442,4	59,08	40,92
	Mum	63,1	35,07	16,34	37,40	107,6	196,41	63,1	259,51	75,68	24,31
5. DPL	Porselen	217,3	63,64	17,56	21,91	76,84	180	217,3	397,3	45,3	54,7
	Metal	842,5	277,7	75,31	79,98	176,5	609,5	842,5	1452	41,98	58,02
	Kumlama	401,4	253,6	197	709,1	485,1	1645	401,4	2046	80,39	19,61
6. DPL	Akril tesviye	128,3	54,62	57,01	190,1	377,9	679,6	128,3	807,9	84,12	15,88
	Metal	1012	184,9	53,15	48,54	85,53	372,1	1012	1385	73,12	26,88
	Kumlama	1115	277,2	122,9	508,5	464,8	1373	1115	2488	55,19	44,81

¹: 2,5 μm 'den büyük partikül maddeler (kaba partiküller)

²: 2,5-1,0 μm arası boyutlardaki partikül maddeler

³: 1,0-0,5 μm arası boyutlardaki partikül maddeler

⁴: 0,5-0,25 μm arası boyutlardaki partikül maddeler

⁵: 0,25 μm 'den küçük partikül maddeler

Table 3. DPL ünitelerindeki toplam PM ve PM_{2,5} konsantrasyonları (µg/m³) (Total PM and PM_{2,5} concentrations in DPL units)

Örnekleme Ünitesi	Ortalama Toplam PM konsantrasyonu ± Std. Sapma p değeri	p değeri
Metal Tesviye	961,57 ± 851,14	
Porselen	365,17 ± 117,04 0,0015	p=0,015
Ku mlama	1264,8 ± 928,67	
	Ortalama PM _{2,5} konsantrasyonu ±Std. Sapma	
Porselen	171 (122) 0,047	p=0,047
Ku mlama	754 (697)	

*: p<0,05

Her bir DPL’de ölçülen PM_{2,5} kütleli konsantrasyonlarının ise 80,8-1645 µg/m³ (ortalama 413,8 ± 406) arasında de ğişt i ğ i tespit edilmiştir. Konsantrasyonların örnekleme noktalarına göre bu kadar geniş bir aralıkta de ğ iş mesi, çalışma ortamı havasının de ğ iş iminde rol oynayan havalandırma sistemleri farkını, iş yoğunlu ğ u farkını ve mesai süresi farkını düşündürmektedir. Bu çalışma kapsamında elde edilen partikül madde kütle ölçüm sonuçları ile benzer çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmak için yapılan araştırmada sınırlı sayıda ve farklı partikül boyutları için ölçümlerin yapıldığı çalışmalara ulaşılabilmıştır. Bu çalışmalardan Abakay ve ark. (2013) DPL’de PM₁₀, Kim ve ark. (2002) PM₅, Hu ve ark. (2006) PM_{2,5} de ğ erlendirmesi yapmışlardır [36, 37, 10]. Hu ve ark. (2006) diş laboratuvarlarında yaptıkları çalışmada PM_{2,5} de ğ erini 26 µg/m³ - 664 µg/m³ arasında ve ortalama olarak 107±112 µg/m³ şeklinde tespit edilmiştir. Çalışma ortamlarındaki olası farklılıklardan dolayı bir başka çalışmanın

Çalışma kapsamındaki DPL’lerinde tespit edilen 2,5 µm’nin altındaki partiküller arasında baskın olan boyut aralığı 1, 2 ve 6 nolu laboratuvarlarda

sonuçları ile tam bir karşılaştırma yapmak mümkün olmasa da bu de ğ erlerin bizim çalışmamızda tespit etti ğ imiz de ğ erlerden düşük oldu ğ u söylenebilir.

Türkiye’de “Tozla Mücadele Yönetmeli ğ i” PM_{2,5} düzeyi için herhangi bir sınır de ğ er belirlemeyip, solunabilir PM (PM<5µm) limit de ğ erini 5 mg/m³ olarak belirledi ğ i için araştırmanın gerçekteştirildi ğ i tüm DPL’lerin 8 saatlik PM_{2,5} de ğ erleri ülke kanun ve yönetmeliklerine uygun olmaktadır [38]. Ancak elde edilen sonuçların; DSÖ tarafından verilen 24 saatlik PM_{2,5} sınır de ğ erininin (25 µg/m³), AB tarafından verilen sınır de ğ erinin (35 µg/m³), Kanada’da geçerli olan sınır de ğ erin (40 µg/m³) ve Norveç’de geçerli olan sınır de ğ erin (20 µg/m³) çok üzerinde oldu ğ u görülmüştür [39, 40].

Örnek alınan tüm çalışma ortamı havasındaki partiküllerin boyutlarına göre ortalama kütleli konsantrasyonları dikkate alındığında, %56’sını PM_{2,5} oluştururken geri kalan kısmını kaba partiküllerin (PM>2,5) oluşturdu ğ u görülmüştür. Bu durum DPL’inde çalışanların daha çok ince partiküllere maruz kaldığı göstermektedir. Ortalama PM_{2,5} konsantrasyonları ile DPL’i karşılaştırıldığında, her bir laboratuvarında ölçülen konsantrasyonların birbirinden farklı oldu ğ u görülmüştür (Tablo 4).

Table 4. DPL’lerinde ölçülen ortalama PM_{2,5} konsantrasyonlarının karşılaştırılması (Comparison of average PM_{2,5} concentrations measured in DPLs)

Örnekleme Noktaları	Konsantrasyon± Std.Sapma (µg/m ³)
1.DPL	294 ± 84
2.DPL	155 ±72
3.DPL	226± 63
4.DPL	225 ± 33
5.DPL	811 ±753
6.DPL	808 ± 513

*:p<0,05

PM_{2,5-1} µm olarak tespit edilirken, 3 ve 4 nolu laboratuvarlarda PM<0,25 µm ve 5 nolu laboratuvarlarda PM_{0,5-0,25} µm olarak tespit edilmiştir

(Tablo 5). DPL'ler ile en çok tespit edilen partikül madde boyut aralığı arasında istatistiksel olarak anlamlı fark bulunmaktadır ($p<0,05$).

En yüksek ortalama $PM_{2,5}$ değerleri %61,5 ve %62,5 oranlarıyla 4 ve 5 nolu DPL'lerde, en düşük $PM_{2,5}$ ortalama değeri ise % 40,1 ile 2 nolu DPL'de görülmüştür.

Çalışma ortam havasındaki partikül maddelerin boyut aralığının tespiti, alınabilecek önlemler açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle yapılan çalışma sonuçları partikül madde boyut aralığına göre değerlendirildiğinde; daha çok metal protez (iskelet) ve köprülerin kaba pürüzsüzleştirme işlemlerinin gerçekleştiği metal tesviye ünitelerinde $PM_{2,5}$ kütle miktarının %48'ini 2,5-1 μm boyut aralığındaki partiküller, kron adı verilen protezin kumla temizlendiği kumlama ünitelerinde $PM_{2,5}$ kütle miktarının %42'sini 2,5-1 μm boyut aralığındaki partiküller ile %40'ını 0,5-0,25 μm boyut aralığındaki partiküllerin oluşturduğu görülmüştür.

Table 5. DPL'lere göre partikül madde boyut dağılımı (Distribution of particulate matter sizes according to DPLs)

Örnekleme Noktaları	En çok tespit edilen partikül boyutu* (%)	μm	p değeri
1.DPL	2,5-1,0	μm	p**=0,04
	(%37,4)		
2.DPL	2,5-1,0	μm	
	(%40,8)		
3.DPL	< 0,25	μm	
	(%33,1)		
4.DPL	< 0,25	μm	
	(%48,9)		
5.DPL	0,5-0,25	μm	
	(%33,2)		
6.DPL	2,5-1,0	μm	
	(%38,3)		

*: $PM_{2,5}$ konsantrasyonu içerisinde en çok görülen boyut aralığı **: $p<0,05$

Küçük partiküller çok düşük konsantrasyonlarda bile sağlığı olumsuz etkilediğinden; havadaki küçük partikül miktarının olabildiğince düşük seviyede tutulması son derece önemlidir [41]. Bu çalışma kapsamında belirlenebilen en küçük partikül boyutu 0,25 μm 'den küçük olan partiküllerdir. $PM_{2,5}$ içerisindeki 0,25 μm 'den küçük boyuttaki partikül maddelerin, porselen gibi

ince pürüzsüzleştirme-polisajın yapıldığı ünitelerde $PM_{2,5}$ kütle miktarının %45 'ini, yanmanın olduğu mum modelaj işlerinde %55'ini, akril tesviyesinin yapıldığı ünitelerde %56'sını oluşturduğu tespit edilmiştir. 0,25 μm 'den küçük partikül konsantrasyonları açısından bir karşılaştırma yapıldığında laboratuvarlar arasında önemli farklılıkların olduğu ($p<0,05$) görülmüş; 309 $\mu g/m^3$ ile en yüksek konsantrasyon 6 nolu DPL 'de, 47 $\mu g/m^3$ ile en düşük konsantrasyon 2 nolu DPL 'de saptanmıştır (Tablo 6).

Tablo 6. 0,25 μm 'den küçük partikül madde konsantrasyonları (Concentrations of particulate matter less than 0,25 μm)

Örnekleme Noktaları	Konsantrasyon (Std.Sapma) ($\mu g/m^3$)	P değeri
1.DPL	55,70 (13,22)	p=0,019
2.DPL	47,35 (28,95)	
3.DPL	74,76 (21,90)	
4.DPL	109,87 (2,34)	
5.DPL	246,15 (212,85)	
6.DPL	309,39 (198,68)	

Çalışma kapsamında seçilen DPL'nda çalışanların ifade ettiği sağlık şikayetleri ile bu ortamlarda yapılan partikül madde kütle ölçüm sonuçları arasında herhangi bir ilişkinin olup olmadığı istatistiksel olarak araştırılarak sonuçlar

Tablo 7'de sunulmuştur. $PM_{2,5}$ kütle konsantrasyonu ile çalışanlarca ifade edilen sağlık şikayetleri karşılaştırıldığında; çalışanların hırıltılı solunum şikayeti için ortalama $PM_{2,5}$ konsantrasyonu açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmıştır. $PM_{2,5}$ konsantrasyonunun yüksek olduğu DPL çalışanlarında bu şikayetin daha yaygın olduğu görülmüştür. Gözlerdeki kaşıntı şikayeti ile $PM_{2,5}$ konsantrasyonu arasında da benzer şekilde anlamlı bir fark saptanmıştır. İş kaynaklı sağlık sıkıntılarının önüne geçmede son çare olarak kullanılan kişisel koruyucu donanım (KKD) kullanım yaygınlığı (bazen kullananlar da dahil) değerlendirildiğinde; maske kullanım yaygınlığının %68, eldiven kullanım yaygınlığının %24, koruyucu gözlük kullanım yaygınlığının ise %6 olduğu tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen laboratuvarlarda en

yaygın kullanılan maske %40,6 ile kağıt maskedir. KKD'den çok daha etkin bir önlem olan aspiratör (vakum) kullanım yaygınlığı değerlendirildiğinde, 5 nolu DPL'nin kumlama ve metal tesviye ünitesi

dışında tüm DPL'lerin tüm ünitelerinde masa başı vakum mevcuttur.

Tablo 7. DPL'lerdeki ortalama PM_{2,5} kütlesi ile çalışanların (sigara içen ve içmeyen) sağlık şikayetlerinin karşılaştırılması (Comparison of symptoms of (smoker and nonsmoker) individuals working with PM_{2,5} mass in DPLs)

Şikayetler	1.DPL (294)*	2.DPL (155)*	3.DPL (226)*	4.DPL (225)*	5.DPL (811)*	6.DPL (808)*		
Göz	Kızarıklık	2	1	2	3	1	4	p=0,24
	Kaşıntı	2	2	2	1	2	4	p=0,016
	Yanma / Sulanma	2	2	1	2	1	3	p=0,60
Solunum	Hırıltılı solunum	1	1	0	0	7	4	p=0,025
	Nefes Darlığı	1	1	2	1	9	5	p=0,07
	Öksürük	1	1	1	0	2	2	p=0,57
	Balgam	1	1	0	0	4	2	p=0,64
Cilt	Kızarıklık	7	0	1	1	0	2	p=0,11
	Kaşıntı	4	2	2	2	0	2	p=0,66
	Döküntü/Kuruluk	1	1	0	1	1	5	p=0,33

*: DPL'deki ortalama PM_{2,5} konsantrasyonu (µg/m³)

Masa başı vakumlara ek olarak DPL'lerin %16'sında cebri havalandırma sistemi, %33'ünde salyangoz sistem adı verilen genel havalandırma

sistemi mevcuttur. Diğerleri ise masa başı vakuma ek olarak pencere tipi aspiratör kullanılmaktadır.

4.TARTIŞMA (DISCUSSION)

DPL çalışanları başta partikül madde olmak üzere pek çok mesleki risk ile karşı karşıya kalmaktadır [40]. Partikül maddelerin sistemik ve lokal etkileriyle ilgili yapılan pek çok çalışmanın özellikle 1939'dan beri literatüre girmiş olan DTP (Diş Teknisyeni Pnömonozu) üzerine olduğu görülmektedir [43, 44]. Literatürde diş protez laboratuvarlarında PM_{2,5} düzeyi ile ilgili araştırma sayısı ise son derece azdır.

PM_{2,5} kütle konsantrasyonu ile DPL'lerdeki örnekleme yapılan üniteler arasında bir karşılaştırma yapıldığında en yoğun PM_{2,5} konsantrasyonlarının kumlama ünitelerinde olduğu görülmüştür. Porselen ile kumlama ünitelerindeki PM_{2,5} kütle konsantrasyonu açısından istatistiksel olarak anlamlı bir fark

bulunmuştur (p=0,047) (Tablo6). Kumlama işlemi daha çok alçı kalıptan çıkan protezin kum tanecikleri ile temizlenmesine dayandığı için kaba partiküller bu üniteye daha çok görülürken, ince pürüzlerin ortadan kaldırılmasına dayanan porselen tesviyesinde ince partiküller açığa çıkmaktadır. Yapılan bu çalışmada porselen ünitelerindeki partikül madde konsantrasyonları dikkate alındığında PM_{2,5} değeri 80,8-355,4 µg/m³ arasında, ortalama 205,4±98,68 µg/m³ olduğu tespit edilmiştir. Kim ve ark.(2002) yapmış olduğu çalışmada bu değer 651±548 µg/m³ şeklinde tespit edilmiştir. Aynı çalışmada Polisaj ünitesindeki partikül madde değeri ise 725±414 µg/m³ şeklinde bulunmuştur. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı'nın yapmış olduğu bir araştırmada Tesviye işlemlerinde solunabilir toz konsantrasyonu 720 µg/m³ olarak tespit edilmiştir

[9]. Ancak bu iki çalışmada da elde edilen değerler PM_{2,5} değil, PM₅ değeridir.

Diş protez laboratuvarlarındaki hava kirliliğinin akciğer hastalıkları riskini arttırdığı bilinmektedir [44-46]. Bu duruma karşı alınabilecek önlemler içerisinde; etkin havalandırma sistemi, bariyer kullanımı ve KKD kullanımı önem taşımaktadır. DPL'lerde kullanılan havalandırma sistemi, masa başı aspiratör kullanımı değerlendirildiğinde, bu araştırmanın yapıldığı DPL'lerin %16,6'sında (Bir DPL'de) cebri havalandırma sistemi, %33'ünde salyangoz sistem adı verilen genel havalandırma sistemi, geri kalanındaysa sadece masa başı vakum ve pencere tipi aspiratör olduğu görülmüştür. Havalandırma sistemleriyle ortamdaki PM_{2,5} konsantrasyonu arasında istatistiksel olarak önemli bir fark bulunmuştur (p=0,000). Cebri havalandırma sisteminin olduğu DPL, PM_{2,5} konsantrasyonunun da en az olduğu, çalışma sirkülasyonunun ise orta yoğun olduğu 2 nolu DPL'dir.

Hu ve ark. (2006) yapmış olduğu çalışmada DPL'lerin %20'sinde genel havalandırma sisteminin olmadığını tespit etmişlerdir. Yurdasal ve ark. (2015) yapmış olduğu çalışmada çalışanların %84,8'inin vakumlu çalışma masalarında çalıştıklarını ancak bunlardan %1,2'sinin hiç kullanılmadığını tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada genel havalandırma sistemine sahip olan DPL oranı %98,8 olarak bildirilmiştir. ÇSGB'nin yapmış olduğu bir çalışmada (2013) ise DPL'lerin %95'inde genel veya lokal havalandırma sistemleriyle ilgili problem saptanmıştır. Gürültülü bir sistem olan havalandırma sisteminin yasal yaptırımlara rağmen kullanım yaygınlığının artmaması, güvenlik kültürünün bu sektör çalışanlarında da pek gelişmemesinden kaynaklandığını düşündürmektedir.

Bu çalışmada kişisel koruyucu donanım kullanım yaygınlığı ve çeşidi değerlendirildiğinde; %26'sının kağıt maske, %22'sinin EN149 tam korumalı maske %16'sının bez maske kullandığı, %36'sının hiç maske kullanmadığı görülmüştür. Eldiven kullanım yaygınlığı %24, koruyucu gözlük kullanım yaygınlığı ise %6'dır.

Hu ve ark.(2006) yaptığı çalışmada KKD kullanım yaygınlığı, bez ya da kağıt maskede %75, aktif kömürlü maskelerde ise %13,3, eldiven kullanım yaygınlığı ise %4,4 olarak bulunmuştur. Yurdasal ve ark. (2015) yapmış olduğu çalışmada diş protez teknisyenlerinde maske kullanım yaygınlığının %69,7, eldiven kullanım yaygınlığının %36,4,

koruyucu gözlük kullanımının ise %47,3 olarak tespit etmişlerdir. Aynı çalışmada maske kullananların %34'ünün kağıt-bez maske kullandığı görülmüştür. Bu çalışma sonucu ile bir karşılaştırma yapıldığında, eldiven kullanım yaygınlığı Hu ve ark. (2006) yapmış olduğu çalışma yılına göre artarken, Yurdasal ve ark. (2015) yapmış olduğu çalışmaya oldukça yakındır. İki çalışma arasındaki geçen yıllar düşünüldüğünde maske ve gözlük kullanımı açısından olumlu gelişmeler yaşanmazken, eldiven kullanım yaygınlığının artmış olduğunu söylemek mümkündür. Kağıt (cerrahi) maskelerin özellikle ince PM açısından hiçbir koruyuculuğu olmamakta sadece, yüze sıçramaları engellemektedir [47, 48]. EN149 korumalı maskeler ise çeşitlerine göre değişmekle birlikte 0,2 µm'nin altında koruma sağlayamamaktadır [49]. Cinkara (2011), yaptığı bir çalışmada %23,2'sinin pnömokonyoz teşhisi konulduğu diş teknisyenlerinin tamamının cerrahi maske kullandığını tespit etmiştir [50].

DPL çalışanlarının sağlık şikayetleri incelendiğinde, tüm çalışanların solunumla ilgili şikayetlerinde %38 dispne (n=19), %34 öksürük (n=17), %26 hırıltılı solunum (n=13), % 18 (n=9) balgam çıkarma yaygınlığı görülmüştür. Yurdasal ve ark. (2015) yapmış oldukları çalışmada diş teknisyenleri arasında dispne %3,6, öksürük yaygınlığını %14,5, hırıltılı solunumu ise %1,2 yaygınlıkta bulmuşlardır. Abakay ve ark. (2013) yapmış oldukları çalışmada %22,5 dispne, %24,4 öksürük, %35,1 balgam çıkarma yaygınlığı bulmuşlardır. Fidan (2000)'in diş teknisyenlerinde silikozisle ilgili yapmış olduğu çalışmada bu oranlar %21,9 dispne ve hırıltılı solunum ; %19,1 öksürük; %41 balgam çıkarma şeklinindedir [51]. Ergün ve ark.(2016) diş teknisyeni pnömokonyozu ile ilgili yaptıkları çalışmada %48 dispne, %38 öksürük, %36 balgam çıkarma yaygınlığı tespit etmişlerdir [52].

Yapılan bu çalışmada DPL'lerin ortalama PM_{2,5} düzeyleri ile çalışanların hırıltılı solunum şikayetleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur (p=0,025). Ortamdaki PM_{2,5} düzeyi arttıka solunum sistemleriyle ilgili şikayetlerinin arttığı görülmektedir (r=0,377). Hu ve ark. (2006) yapmış olduğu çalışmada ise PM_{2,5} değeri ile diş teknisyenlerinin solunum fonksiyonları arasında anlamlıya yakın bir ilişki olduğu sonucu çıkmıştır.

Bu çalışmada sigara içmeyen çalışanlar dikkate alınarak şikayetler incelendiğinde; sigara içmeyen

28 DPL çalışanının %28,5 (n=8)'inde dispne, %17,8'inde hırıltılı solunum (n=5), %10,7'sinde balgam, %4'ünde öksürük yaygınlığı görülmüştür (n=3). Kim ve ark. (2002) yapmış olduğu çalışmada ise sigara içmeyen diş teknisyenleri arasında %35,29 dispne, %35,29 hırıltılı solunum, %29,41 balgam, %23,53'ünde öksürük şikayeti yaygınlığı bulmuşlardır. Ergün ve ark. (2016) yapmış olduğu çalışmada sigara içmeyen diş protez teknisyenlerinin %21'inde öksürük, balgam, nefes darlığı bulgularını saptamışlardır. Radi (2002)'nin yapmış olduğu çalışmada diş teknisyenleri ile kontrol grubunu karşılaştırmış ve sigara içmeyen diş teknisyenlerinin sigara içmeyen kontrol grubuna göre solunum fonksiyon testlerinde düşüş olduğu bulunmuştur [27]. Sigaranın solunum sistemi üzerindeki olumsuz etkileri yıllardır bilinmektedir. Sigara kullanma alışkanlığı olmayan çalışanlarda solunum sistemi şikayetlerinin görülmesi ise son derece önemlidir. Bu sektör çalışanlarında solunum sistemi ile ilgili şikayetlerin varlığı, üzerinde çok çalışılmış bir konudur. Ancak PM_{2,5} düzeyi ile solunum sistemi şikayetleri ilk kez bu çalışmada ilişkilendirilmiştir.

Bu çalışmadaki DPL çalışanlarının gözle ilgili şikayetleri incelendiğinde %26 kızarıklık, %26 kaşıntı, %22 yanma-sulanma yaygınlığı görülmüştür. Yurdasal ve ark. (2015) yapmış olduğu çalışmada diş teknisyenleri arasında genel olarak göz şikayetleri %15,2 yaygınlığında bulunmuştur. Özdemir (2006)'in yaptığı çalışmada gözde sulanma ve kaşıntı %63,9, kızarıklık %41,7, yanma-batma %44,4 olarak bulunmuştur [53]. DPL'lerdeki PM_{2,5} konsantrasyonu ile gözlerde kaşıntı şikayeti arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark saptanmıştır (p=0,016). Literatürde PM_{2,5} düzeyi ile solunum fonksiyonları dışında işle ilgili diğer sağlık şikayetlerinin araştırıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Gözde belirtilen şikayetler ile özellikle 1-0,5 µm partikül boyutunda istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur. Gözde görülen şikayetler 1-0,5 µm partikül boyutundaki partikül madde miktarı arttıkça artmaktadır (r=0,190).

Bu çalışmada dermal şikayetler incelendiğinde %24 kaşıntı, %22 ciltte kızarıklık, %18 döküntü-kuruluk şikayetleri saptanmıştır. Cilt şikayetleri ile 0,5-0,25 µm partikül boyutunda istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmuştur (p>0,05). Cilt şikayetleri 0,5-0,25 µm partikül boyut aralığında partikül madde konsantrasyonu arttıkça yaygınlaşmaktadır (r=0,232) Jakobsen (1993)'in

yaptığı çalışmada dermal problemler %28 ile en önemli ikinci işle ilgili sağlık problemi olarak saptanmıştır [54]. Çımrın ve ark. (2009) yapmış olduğu çalışmada ise dermal lezyon yaygınlığı da değerlendirilmiş ve %10,7 olarak bulunmuştur [55].

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Kamu Ağız ve Diş Sağlığı Merkezleri ya da Diş Hastaneleri, 4734 sayılı Kamu İhale ve Hizmet Alımı İhaleleri Uygulama Yönetmeliği uyarınca, diş protezlerini DPL'ndan temin etmektedir. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı'nın 2013 yılında hazırladığı raporda, ülkemizde DPL'lerin genellikle küçük işletmeler şeklinde olmasından dolayı, bu işletmeler sayıca artış gösterirken iş hijyeni şartlarının aynı oranda gelişemediği ifade edilmektedir. Özellikle kamu hastanelerinden ihale alan DPL'lerde en uygun fiyata ihalenin alınması, kalitesiz malzeme kullanımı, uzun çalışma saatleri, kayıt dışı çalıştırma gibi sorunları beraberinde getirdiği ÇSGB'nin çalışmasında (2013) tespit edilmiştir.

Bu çalışma kapsamında ölçüm yapılan DPL'lerdeki 0,25 µm'den küçük boyuttaki PM konsantrasyonu ile hırıltılı solunum şikayeti arasında anlamlı bir ilişki saptanmıştır. Bu boyuttaki PM değeri arttıkça şikayetler artmaktadır. Aynı zamanda havalandırma sistemi iyi olan çalışma alanlarında bu boyuttaki partiküllerin konsantrasyonlarının daha az olduğu tespit edilmiştir. 0,25 µm'den küçük partiküllerin halihazırda kullanılan maskelerden rahatça geçebildiği düşünöldüğünde ve havalandırma sisteminin bu boyut aralığında PM'ler üzerinde etkili olduğu varsayımıyla iyi havalandırma sistemlerinin çalışan sağlığı açısından son derece önemli olduğu görölmektedir.

Ülkemizde bu mesleğe başlangıç yaşı genellikle oldukça küçüktür. Mesleğe başlayanlar öncelikle kumlama ünitelerinde işe başlayarak daha sonra farklı ünitelerde mesleklerini icra etmektedirler [55]. Genellikle 2,5-1 µm boyut aralığında PM'lerin göröldüğu kumlama ünitelerinde genç yaşta mesleki risklerinin farkında olmayan işçilerin çalıştırılması iyi bir havalandırma sistemini ve etkin KKD'leri zorunlu kılmaktadır.

İç ortam havasında PM_{2,5} ile ilgili ulusal bir sınır değeri olmaması ve hali hazırda ince partiküllerle ilgili olan sınır değerin yüksek olması DPL çalışanlarının sağlığının korunmasında önemli

eksikliklerden biridir. En kısa zamanda yasal düzenlemelerle uygun sınırların oluşturulmasıdır.

Partikül maddelerin zararlı etkisini en az düzeye indirmek için, etkili bir havalandırma sistemi kullanmak, toz kaynağı ile çalışan arasına bariyer koymak, yapılan işe ve çalışana uygun maske, gözlük, eldiven gibi kişisel koruyucu donanımlar kullanmak, bu meslek grubu için alınması gereken iş sağlığı ve güvenliği önlemleri arasında sayılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde desteklerinden dolayı Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İSGÜM Kocaeli Bölge Laboratuvarı Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] S.Taner, B.Pekey, D.Arslanbaş, H.Pekey, "Restoranlarda Farklı Boyut Aralıklarındaki Partikül Madde Konsantrasyonlarının belirlenmesi,"9. *Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, Samsun, 5-8 Ekim, 2011.
- [2] A.Soyosal, Y.Demiral, "Kapalı Ortam Hava Kirliliği", *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, vol.6, no.3, pp. 221-226, 2007.
- [3] ÇSGB, Meslek Hastalıkları Rehberi, 2011.
- [4] NIOSH https://www.cdc.gov/air/particulate_matter.html
- [5] Ed. B.W Stewart., C.P. Wild, World Cancer Report, 2014.
- [6] S.S.Lim, T.Vos, A.D. Flaxman et al. "A Comparative Risk assesment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk clusters in 21 regions, 1990-2010: asystematic analysis for the global burden of disease study 2010," *Lancet*, vol.380, pp. 2224-60, 2012.
- [7] K.L. Van Landuyt, K.Yoshihara, B. Geebelen, M. Peumans, L.Godderis, P.Hoet, et al. "Should we be concerned about composite (nano-) dust?," *Dent Mater*, vol. 28, no. 11, pp. 1162-70, 2012.
- [8] Resmi Gazete, 18.04.2014/28976 İş yeri Tehlike Sınıfları Listesi www.mevzuat.gov.tr

- [9] T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı İş Teftiş Kurulu Başkanlığı Diş Protez Laboratuvarlarında Çalışan Teknisyenlerin Pnömonyoz Ve Diğer Meslek Hastalıklarına Maruziyetinin Önlenmesi, Laboratuvarların İş Sağlığı Ve Güvenliği Şartlarının İyileştirilmesi Hedefli Programlı Teftiş Sonuç Raporu, pp. 12-21, 2013.
- [10] S.W. Hu, Y.Y. Lin, T.C. Wu, C.C. Hong, C.C. Chan, S.C.C. Lung, "Workplace air quality and lung function among dental laboratory technicians," *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 49, pp. 85-92, 2006.
- [11] A. Nayebzadeh, A. Dufresne, "Evaluation of exposure to methyl methacrylate among dental laboratory technicians," *Am Ind Hyg Assoc J*, vol. 60, pp. 625-628, 1999.
- [12] A.Nayebzadeh, A. Dufresne, S.Harvie, R.Begin "Minerology of lung tissue in dental technicians' pneumoconiosis," *American Industrial Hygiene Assosiation Journal*, vol. 60, pp. 349-53, 1999.
- [13] C.G. Parks, K. Conrad, G.S. Cooper, "Occupational exposure to crystalline silica and autoimmune disease," *Environ Health Perspect* 107, suppl 5, pp. 793-802, 1999.
- [14] D.Choudat, "Occupational lung diseases among dental technicians," *Tubercle Lung Dis*, vol.75, pp. 99-104, 1994.
- [15] J.Y. Lee, J.M. Yoo, B.K. Cho, H.O. Kim, "Contact dermatitis in Korean dental technicians," *Contact Dermatitis*, vol. 45, pp. 13-16, 2001.
- [16] J.Kettelarji, S.Nilsson, K. Midander, C. Liden, A. Julander, "Snopshot of cobalt, chromium and nickel exposure in dental technician," *Contact Dermatitis*, vol. 75, pp. 370-76, 2016.
- [17] N. Torbica, S. Krstev, "World at work: Dental laboratory technicians," *Occupational and Environmental Medicine*, vol.63, no. 2, pp. 145-148, 2006.
- [18] D.Petrovic, N. Krunic, M. Kostic, "Risk factors and preventive measures for occupational diseases in dental technicians," *Vojnosanit Pregl*, vol. 70, no. 10, pp. 959-963, 2013.
- [19] H. Altınöz, C. Çelikkalkan, G.D. Horasan, F. Hamşioğlu, N. Cengiz, H. Orbay, "Socio-

- demographic and clinical characteristics of Turkish workers with pneumoconiosis,” *Cent Eur J Public Health*, vol. 24, no. 3, pp. 231-3, 2016.
- [20] 2011 yılı iş kazası ve meslek hastalıkları istatistikleri
http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari
- [21] US EPA <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [22] Sağlık Bakanlığı, Türkiye'nin Hava Kirliliği Ve İklim Değişikliği Sorunlarına Sağlık Açısından Yaklaşım, pp. 29-30, Ankara, 2010.
- [23] İşyeri hekimi ileri eğitim programı eğitim modülü, 2015.
http://www.ttb.org.tr/MS/index.php?option=com_content&task=view
- [24] A.Soyal, Y.Demiral, “Kapalı Ortam Hava Kirliliği”, *TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni*, vol.6, no.3, pp. 221-226, 2007.
- [25] L.C. Renwick, K. Donaldson, and A. Clouter, “Impairment of alveolar macrophage phagocytosis by ultrafine particles,” *Toxicol. Appl. Pharmacol*, vol.172, pp. 119– 127, 2011.
- [26] M.L.Bell, “Assessment of the health impacts of particulate matter characteristics,” *Research Report 161, Health Effects Institute Boston*, Massachusetts, 2012.
- [27] S. Radi, J.C. Dalphin, P. Manzoni, D. Pernet, MP. Leboube, J.F. Viel, “Respiratory morbidity in a population of French dental technicians,” *Occup Environ Med*, vol. 59, pp. 398-404, 2002.
- [28] D. Sherson, N. Maltbaek, O. Olsen, “Small opacities among dental laboratory technicians in Copenhagen,” *Br J Ind Med*, vol. 45, pp. 320-4, 1988.
- [29] E. Kardeşoğlu, M. Yalçın, Z. Işılak, “Hava kirliliği ve kardiyovasküler sistem,” *TAF Prev Med Bull*, vol. 10, no.1, pp. 97-106, 2011.
- [30] C.A. Pope, A. Bhatnagar, J. Mc Cracken, W.T.Abplanalp, D.J.Conklin, T.E. O'Toole , “Exposure to fine particulate air pollution is associated with endothelial injury and systemic inflammation” *Circ Res*, vol. 119, no. 11, pp. 1204-14, 2016.
- [31] Z. Ying, P. Yue, X. Xu, et al. “Air pollution and cardiac remodeling: a role for RhoA/Rho-kinase,” *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, vol. 296, pp. 1540–1550, 2009.
- [32] R.W. Atkinson, S. Kang, H.R. Anderson, I.C. Mills, H.A. Walton, “Epidemiological time series studies of PM2.5 and daily mortality and hospital admissions:a systematic review and meta-analysis,” *Thorax*, vol. 69, pp. 660–665, 2014.
- [33] A.S.V. Shah, K.K. Lee, D.A. McAllister, A. Hunter, H. Nair, W. Whiteley, J.P. Langrish, D.E. Newby N.L. Mills, “Short term exposure to air pollution and stroke: systematic review and meta-analysis,” *BMJ*, vol.350, no.1295, pp. 1-10, 2015.
- [34] A. Şakar, E. Kaya, P. Çelik, N. Gencer, O. Temel, N. Yaman, L. Sepit, Ç.A. Yıldırım, L. Dağyıldızı, E. Coşkun, G.Dinç, A.Yorgancıoğlu, A.H.Çımrın, “Seramik fabrikası işçilerinde slikozis” *Tüberküloz ve Toraks Dergisi*, vol.53, no.1, pp. 150-155, 2005.
- [35] Türk Toraks Derneği,
<http://toraks.org.tr/subDefault.aspx?sub=177&menu=39>
- [36] A. Abakay, S. Atılğan, O. Abakay, Y. Atalay, S. Güven, F. Yaman, Y. Palancı, G. Tekbaş, A. Dallı, C. Tanrıku, “Frequency of respiratory function disorders among dental laboratory technicians working under conditions of high dust concentration,” *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, vol. 17, pp. 809-14, 2013.
- [37] T.S. Kim, H.A. Kim, Y. Heo, Y. Park, C.Y. Park, Y.M. Roh, “Level of silica in the respirable dust inhaled by dental technicians with demonstration of respirable symptoms,” *Ind Health*, vol.40, pp. 260–265, 2002.
- [38] Tozla Mücadele yönetmeliği,
<http://www.mevzuat.gov.tr/Metin.Aspx?MevzuatKod=7.5.18989&MevzuatIliski=0&sourceXmlSearch>
- [39] L.P. Naehar, G. L. Achtemeier, J.S. Glitzenstein, D.R. Streng, and D. Macintosh, “Real-time and time-integrated PM2.5 and CO from prescribed burns in chipped and non-chipped plots: firefighter and community exposure and health

- implications” *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, vol. 16, pp. 351–361, 2006.
- [40] H.Bulut, “Konutlarda İç Hava Kalitesi İle İlgili Ölçüm Sonuçlarının Analizi”, 8. *Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 25-28 Ekim, 2007.
- [41] WHO. Ambient (outdoor) air quality and health. Erişim tarihi: 17 Ocak 2016, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- [42] B.Yurdasal, N.Bozkurt, A.İ. Bozkurt, Ö. Yılmaz, “The evaluation of the dust-related occupational respiratory disorders of dental laboratory technicians working in Denizli Province” *Ann Thorac Med*, vol. 10, no. 4, pp. 249–255, 2015.
- [43] C.Karaman Eyüboğlu, O. İtil, A. Gülşen, A. Kargı, A. Çımrın, “Diş teknisyeni pnömokonyozu olgusu” *Tüberküloz ve Toraks Dergisi*, vol. 56, no.2, pp. 204-210, 2008.
- [44] D. Ergün, R.Ergün, C. Özdemir, T.N. Özış, H. Yılmaz, İ. Akkurt, “Pneumoconiosis and respiratory problems in dental laboratory technicians: analysis of 893 dental technicians”, *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, vol. 27, no. 5, pp. 785 – 796, 2014.
- [45] D.Doğan, S. Berk, C. Gümüş, A. Özdemir ve İ. Akkurt, “Diş teknisyenlerinde akciğer hastalığı üzerine uzun süreli bir çalışma: Yedi yıl sonra neler değişti?,” *Mesleki Tıp ve Çevre Sağlığı Dergisi*, vol. 26, no. 5, pp. 293-701
- [46] A. Alavi, M. Shakiba, A. Tangestani Nejad, S. Massahnia, A. Shiari, “Respiratory findings in dental laboratory technicians in rasht (North of Iran)”, *Tanaffos*, vol. 1, no. 2, pp. 44-49, 2011.
- [47] A. Beşer, S. Topçu, “Sağlık alanında kişisel koruyucu ekipman kullanımı,” *DEUHYO ED*, vol. 6, no. 1, pp. 241-47, 2013.
- [48] NIOSH Guidelines for Protecting the Safety and Health of Health Care Workers, <http://www.cdc.gov/niosh/docs/88-119/>
- [49] B. Hendem, “İş sağlığı ve güvenliğinde kullanılan kişisel koruyucu donanımlar ve standartları,” Gazi Üniv. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, yüksek lisans, pp. 41-45, 2007.
- [50] M. Cinkara, “Kahramanmaraş İlinde çalışan diş teknisyenlerinde pnömokonyoz sıklığının değerlendirilmesi,” Sütçü İmam Üniv., Göğüs hastalıkları AD, Tıpta Uzmanlık, pp. 39-48, 2006.
- [51] S. Adıyeke Fidan, “Diş protez teknisyenlerinde silikozis görülme sıklığı,” Gazi Üniv. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, pp. 28-44, 2000.
- [52] D. Ergün, R. Ergün, E. Evcik, T. Nadir Özış, İ. Akkurt, “The relation between the extent of radiological finding and respiratory functions in pneumoconiosis cases of dental technicians who are working in Ankara,” *Tüberküloz ve Toraks*, vol. 64, no. 2, pp. 127-134, 2016.
- [53] D. Özdemir, “Diş protez teknisyenlerinde gürültü, toz ve kimyasallar ile gelişebilen meslek hastalıklarının incelenmesi,” Cumhuriyet Üniv. Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Doktora, pp. 57-68, 2006.
- [54] N. Jakobsen, A.H. Pettersen, “Self-reported occupation-related health complaints among dental laboratory technicians,” *Quintessence International*, vol. 24, no. 6, pp. 409-15, 1993.
- [55] A. Çımrın, N. Kömüs, C. Karaman, K.C.Tertemiz, “Pneumoconiosis and work-related health complaints in Turkish dental laboratory workers,” *Tuberk Toraks*. vol. 57, no. 3, pp. 282-8, 2009.