

SAÜ Fen Bil Der  
Ekim, 21(5), 2017  
e-issn: 2147-835X  
saujs@sakarya.edu.tr  
www.saujs.sakarya.edu.tr



**SAKARYA**  
ÜNİVERSİTESİ

# SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ

**Sakarya University Journal of Science**



e-issn: 2147-835X

**Cilt 21 Sayı 5**

**Volume 21 Issue 5**

Ekim / September 2017

<http://www.saujs.sakarya.edu.tr/issue/26998>



Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi  
Sakarya University Journal of Science

Editör Listesi

Editorial Board

Cilt 21 Sayı 5, Ekim 2017

Volume 21 Issue 5, September 2017

Editör  
Executive Editor

Emrah Doğan Sakarya Uni.

Genel Yayın Yönetmeni  
General Publication Director

Naci Çağlar Sakarya Uni.

Editör Yardımcıları  
Assistant Editors

Ahmet Zengin	Sakarya Uni.	Sadık Bağcı	Sakarya Uni.
Beytullah Eren	Sakarya Uni.	Serkan Zeren	Kocaeli Uni.
A. Serhat Demir	Sakarya Uni.	Şevket Gür	Sakarya Uni.
Cüneyt Bayılmış	Sakarya Uni.	Yusuf Çay	Sakarya Uni.
Kerem Küçük	Kocaeli Uni.	Zafer Barlas	Sakarya Uni.
Mehmet Nebioğlu	Sakarya Uni.		

Bölüm Editörleri  
Section Editors



Ahmet Aygün	Bursa Teknik Uni.	Mahmut Özacar	Sakarya Uni.
Ali Çoruh	Sakarya Uni.	Maryna Van De Venter	Nelson Mandela M. Uni
Ali Pınar	Boğaziçi Uni.	M. İskender Özsoy	Sakarya Uni.
Ali Sarıbiyık	Sakarya Uni.	Mehmet Ozen	Sakarya Uni.
Aliye Suna Erses Yay	Sakarya Uni.	Murat Tuna	Sakarya Uni.
Alparslan Demir	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.
Ertan Bol	Sakarya Uni.	Osman Kırtel	Sakarya Uni.
Faruk Yalçın	Sakarya Uni.	Özer Uygun	Sakarya Uni.
Fatih Çalışkan	Sakarya Uni.	Özgül Keleş	İstanbul Teknik Uni
Halil Yiğit	Kocaeli Uni.	Peter Claisse	Coventry Uni.
Hüseyin Aksoy	Sakarya Uni.	Ramazan Meral	Bingöl Uni.
Hüseyin Pehlivan	Sakarya Uni.	Sema Salur	Rochester Uni.
İdris Cesur	Sakarya Uni.	Sezgin Kaçar	Sakarya Uni.
İhsan Pehlivan	Sakarya Uni.	Tahsin Turgay	Sakarya Uni.
İlkay Şişman	Sakarya Uni.	Tijen Talas Oğraş	TÜBİTAK
İnan Keskin	Karabük Uni.	Vezir Ayhan	Sakarya Uni.
Jamal Khatib	Wolverhampton Uni.	Yılmaz Uyaroğlu	Sakarya Uni.

# İÇİNDEKİLER

Investigation the performance of 0-D and 3-d combustion simulation softwares for modelling HCCI engine with high air excess ratios	750-758
Gökhan Coşkun, Üsâme Demir	
Typical cracks in deck of ship-shaped structures and ways to modify and improve the design	759-768
Özgür Özgüç	
Evaluation of the instability problems in rock slopes surrounding historical Safranbolu by kinematic analysis	769-781
İnan Keskin	
CFD simulation of energy sources in EAF	782-791
Ekrem Büyükkaya	
A literature review on road surface marking materials and retroreflectivity properties	792-805
Metin Mutlu Aydın	
A review on effect of process parameters on weld features of copper and brass material in FSW and FSSW methods	806-815
Zafer Barlas	
Investigation of the soil characteristics for coastal zone land-use planning, Kandira, Izmit	816-823
T. Fikret Kurnaz	
Optimization of the cutting parameters effect to surface roughness with taguchi method in free form surface	824-830
Harun Yaka, Halil Demir, Arif Gök	
Structural damages of a model building due to destruction of an adjacent building and their influences on the performance levels	831-841
Turgay Çoşgun	
Effects of irregularities in reinforced concrete structures on building behaviors	842-850
Melike İlkhun	
Investigating the problems associated with interior air quality of bedrooms in boarding schools and developing a new system	851-859
Mustafa Ertürk	
Ensuring slope stability with piled retaining system	860-870
Ertan Bol, Aşkın Özocak, Sedat Sert	
The effects of waste biodiesel usage on engine performance and emissions at a single cylinder diesel engine	871-878
Mustafa Aydın, Mehmet Afşar, M. Bahattin Çelik	
Seebeck Coefficient of Ca <sub>2.8</sub> Pr <sub>0.2</sub> Co <sub>4</sub> O <sub>9</sub> Synthesized by Sol-Gel Method with Thermal and Structural Characterization	879-885
Enes Kılınç, Mücahit Abdullah Sarı, Fatih Uysal, Erdal Çelik, Hüseyin Kurt	
Effects of the semi die/plug angles on cold tube drawing with a fixed plug by FEM for AISI 1010 steel tube	886-892
Sadettin Orhan, Fahrettin Öztürk, Jabbar Gattmah	
Comparison of GFRP profile wear performance with classic concrete wear properties	893-898
Ferhat Aydın	
The comparison of the experimental and theoretical torsional moment results of reinforcement concrete beams	899-906
Abdulkadir Cuneyt Aydın, Barış Bayrak	
Analyzing the effects of biomass and coal ash for the dewatering properties of sewage sludge	907-914
Ömer Hulusi Dede, Derya Akbulut	
Hierarchical network model and SWOT analysis for a strategy selection problem in tourism sector with fuzzy data: case of Turkey	915-931
G.Nilay Yücenur	
The effects of different compression ratios and spark advances on the performance and emissions of a spark ignition engine with a new combustion chamber	932-942
Abdurrahman Demirci, Hüseyin Emre Doğan, Ömer Cihan, Osman Akın Kutlar, Rafiq Mehdiyev, Hikmet Arslan	

# İÇİNDEKİLER

Investigation of minimization and reusability of the reject from electro dialysis processes: an example textile wastewater	943-950
Fatih İlhan	
A flow-focused facility layout application in food machine industry	951-960
Nevra Akbilek	
Tool life enhancement in cold bolt forging process: effect of forging stage design	961-967
Cenk Kılıçaslan, Umut İnce	
The effects of layer arrangements on fundamental frequency of layered beams in axial direction	968-977
Savaş Evran, Yasin Yılmaz	
Theoretical and experimental analysis of prestressed monoton type wire rope	978-989
Cihan Demir, Erkan Ala	
Xylem related p,p'-DDE uptake mechanism by cucurbita pepo spp pepo from contaminated soil	990-999
Mehmet İşleyen, Ahmet Aygün, Beytullah Eren	
The evolution of removal mechanism of chlortetracycline by nanoscale zero valent iron from aqueous solution	1000-1007
Hande Türk, Özge Hanay	
The use of life cycle analysis on the packaging waste management	1008-1017
Aliye Suna Erses Yay	
Ensuring the Safety of Karabük Industrial Zone Landslide	1018-1022
Aşkın Özocak, Sedat Sert, Ertan Bol	
Experimental and numerical investigation of pressure loss in a wall flow particulate filter	1023-1030
Vezir Ayhan, Yunus Özkan, İbrahim Özsert, İdris Cesur	
Performance comparison of different clustering methods for manufacturing cell formation	1031-1044
Sinem Büyüksaatçı Kiriş, Fatih Tüysüz	
Mechanical, physical and morphological properties of polypropylene/huntite composites	1045-1050
Yasin Kanbur, Ümit Tayfun	
Effect of drill geometry on hole quality and cutting performance	1051-1066
Mehtap Yavuz, Harun Gökçe, Çağlar Yavaş, İhsan Korkut, Ulvi Şeker	
Ergonomic analysis of assembly unit in a transformer company	1067-1080
Demet Gönen, Ali Oral, M. A. Beyazıt Ocaktan, Aslan Deniz Karaoğlan, Abdullah Cicibaş	
Numerical investigation of operating fluid, rotating disk speed effects and number of cavities on drag reduction of micro-textured surfaces for hydrodynamic lubrication	1081-1087
Ali Bahadır Olcay, Ahmet Çağrı Develi	
Comparison of properties of basic refractory bricks which use in rotary kiln of cement industry	1088-1094
Fatih Apaydın, Koray Kaya	
Carbon footprint studies on Esentepe Campus of Sakarya University, Turkey in 2015	1095-1099
Ratha Sreng, Mahnaz Gümrükçüoğlu Yiğit	
Systematic design and design thinking approach for conceptual design process: small household appliance design	1100-1109
Zeynep Parlar, Eray Kaan Soyboru, Mustafa Sefa Burhan, Sena Davaslıgil	
Oxley modelleme yaklaşımının tahmin doğruluğu ve verimliliğinin artırılması	1110-1120
Mehmet Aydın	

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 09.05.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 20.10.2016	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.283480	

## Sıfır ve üç boyutlu yanma simülasyonu yazılımlarının HCCI motorunun yüksek hava fazlalık oranı için modellenmesindeki performanslarının incelenmesi

Gökhan Coşkun<sup>1</sup>, Üsâme Demir<sup>1\*</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada, Birincil Referans Yakıtı (BRY) (% 85 izo-oktan ve % 15 n-heptan) ile çalıştırılmış homojen dolgulu sıkıştırma ile ateşlemeli (HCCI) bir motorun simülasyonu için kullanılan sıfır boyutlu (0-B) ve üç boyutlu (3-B) yazılımların performansı incelenmiştir. 0-B yazılım olarak Stokastik Reactor Model (SRM) tekniği ile motor yanması analizleri yapabilen SRM Suit kullanılmıştır. 3-B motor yanması simülasyonları için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) simülasyonları yapabilen Ansys-Fluent programı kullanılmıştır. Her iki ticari yazılım ile HCCI motor için yapılan simülasyonlar silindir içi basınç değişimi, ısı yayılım oranı ve emisyonlar açısından incelenmiştir. BRY yakıtının yanma analizinin yapılabilmesi için Tsurushima tarafından geliştirilen 33 bileşen ve 38 reaksiyon içeren kimyasal kinetik mekanizma kullanılmıştır. Analiz sonuçları ile deneysel basınç, ısı yayılım oranı ve emisyon değerleri kıyaslanmıştır. Analiz sonuçlarına bakıldığında her iki yazılımın birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** 0 ve 3 Boyutlu Analiz Yazılımı, Kimyasal Kinetik Mekanizma, İçten yanmalı motor

### Investigation the performance of 0-D and 3-d combustion simulation softwares for modelling HCCI engine with high air excess ratios

### ABSTRACT

In this study, performance of zero and three dimensional simulations codes that used for simulate a homogenous charge compression ignition (HCCI) engine fueled with Primary Reference Fuel PRF (85% iso-octane and 15% n-heptane) were investigated. 0-D code, called as SRM Suite (Stochastic Reactor Model) which can simulate engine combustion by using stochastic reactor model technique were used. Ansys-Fluent which can simulate computational fluid dynamics (CFD) was used for 3-D engine combustion simulations. Simulations were evaluated for both commercial codes in terms of combustion, heat transfer and emissions in a HCCI engine. Chemical kinetic mechanisms which developed by Tsurushima including 33 species and 38 reactions for surrogate PRF fuel were used for combustion simulations. Analysis showed that both codes have advantages over each other.

**Keywords:** 0-D and 3-D Simulation Software, Chemical Kinetic Mechanism, Internal Combustion Engine

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya – gcoskun@sakarya.edu.tr, udemir@sakarya.edu.tr,

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde artan araç sayısı ve emisyonlara getirilen kısıtlama nedeniyle içten yanmalı motorların daha verimli hale getirilmesi için yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Bu çalışmaların deneysel olarak yapılması yüksek maliyetlere ve deney setinin kurulum aşamasında büyük bir zaman kaybına neden olmaktadır. Bu sebeple içten yanmalı motorların simülasyonu üzerine yeni yazılımlar geliştirilmekte ve var olan yazılımların daha gerçekçi yanma modeli oluşturabilmek için sürekli güncelleme çalışmaları yapılmaktadır. Yanma fenomeni birkaç farklı şekilde modellenmektedir fakat bu yöntemlerden en güvenilir, çok daha gerçekçi sonuç veren ve kimyasal olayları detaylı bir şekilde çözülmesini sağlayan metotların başında gelen kimyasal kinetik mekanizmaların doğrudan kullanımı için literatürde mevcut birçok kimyasal mekanizma bulunmaktadır. Yüksek karbonlu yakıtlar için geliştirilen detaylı kimyasal kinetik mekanizmalar genelde fazla sayıda bileşene ve kimyasal reaksiyona sahip olmaktadır. Zamana bağlı olmayan, sabit yanma şartlarına sahip analizlerde sıfır boyutlu çözümler ile yüksek karbonlu yakıtlar için detaylı kimyasal mekanizmalar kullanılarak çözüm yapmak günümüz bilgisayarı ile dakika mertebesine kadar indirgenmiştir [1].

Son yıllarda geliştirilen, sıfır boyutlu yanma analizi yapabilen yazılımlara, içten yanmalı motorları doğru ve efektif olarak modelleyebilme kabiliyeti kazandırılmaya çalışılmaktadır. Bu yazılımlardan biri olan SRM Suite [2] asıl geliştirilme amacı olan içten yanmalı motorlarda yanma ve emisyon analizlerini, stokastik çözüm metodu kullanarak yapabilmektedir. Stokastik çözüm denklemleri sayesinde yapılan içten yanmalı motor analizlerine göreceli olarak boyut kazandırmaktadır. SRM modeline eklenen hayali partiküller çözüm anında skolastik bir dağılım sergilerler. Her bir stokastik partikül için bulunduğu konuma göre ısı transferi denklemleri ile ilk çözüm yapılarak sıcaklığı hesaplanır. Bulduğu konuma göre sıcaklığı hesaplanan partikül için kimyasal kinetik modelin termodinamik verisi aracılığı ile yanma reaksiyonu çözümü yapılır. Bu sayede modelin farklı alanlarında farklı yanma reaksiyonları oluşarak sanki 3 boyutluymuş gibi çözüm

yapılabilmektedir ve bu sayede diğer sıfır boyutlu çözümlerden daha doğru sonuçlar verebilmektedir. Yazılımın güvenilirliğini ve kabiliyetini inceleyen birçok yayın literatürde bulunmaktadır. Farklı motor konseptleri ve yanma koşullarında SRM yazılımının kullanılabilirliğini tespit etmek için yapılan çalışmalardan bazıları; manifolddan yakıt püskürtmeli HCCI motor modellemesi [3] [4] [5] alternatif yakıt karışımlarının motor yanmasına etkilerinin modellenmesi [6] [7] erken ve tek enjeksiyonlu HCCI motor modellemesi, çift püskürtmeli HCCI motor modellemesi [8] [9] çoklu-çevrimli sürekli olmayan simülasyon ve kontrolü [10] [11] [12], is oluşumu [13] ve HAD programı olan KIVA programı [14] ile ortak çalışarak yanma analizleri gerçekleştirmişlerdir.

Deney sistemlerinin hem maliyetli hem de uzun zaman alan prosedürler olmasından dolayı içten yanmalı motorların yanmasını analiz edebilmek için HAD yazılımlarının kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Motor tasarımı yapılırken deneysel çalışmanın yerine bilgisayar ortamında tasarımların gerçekleştirilmesi zamandan ve maliyetten ciddi oranda tasarruf sağlanmasına olanak vermektedir. Silindir içi yanma analizi yapan birçok HAD yazılım mevcuttur ve motor yanması konusunda günümüze kadar birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Doğalgaz yakıtı ile çalışan bir HCCI motorda ön yanma odasının olması ve olmaması durumunda silindir içi yanma ve emisyon parametreleri AVL FIRE yazılımı ile incelenmiş ve ön karışım odasının olmaması durumunda maksimum yanma basıncı ve ısı yayılım oranının arttığı, NO emisyonunun yanma odasının orta kısmında oluştuğu, CO ve HC emisyonlarının ise azaldığı gözlemlenmiştir. Düşük eş değerlik oranlarında ön karışım odasının olmamasının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [15]. Doğalgaz ve dizel çift yakıtı ile çalışan HCCI bir motorda EGR oranlarının değişiminin etkisi AVL FIRE yazılımı yardımıyla incelenerek ekserji analizleri gerçekleştirilmiştir. EGR oranının artması ile ateşlenme oranı artmış, maksimum basınç ve sıcaklık azalmış, egzoz kayıpları artmış aynı zamanda toplam ısı kaybı ve yanmış yakıt miktarlarında azalma meydana geldiği görülmüştür [16]. BRY yakıtı ile çalışan bir HCCI motorda H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kimyasal bileşeninin oluşumu hem deneysel hem de ANSYS-Fluent HAD ve SRM simülasyonları ile incelenmiştir. Ön yanmanın oluşumu ve ana (hızlı)

yanmanın başlaması için önemli birer bileşen olan  $H_2O_2$ 'nin için yapılan deneyler bilgisayar ortamında tekrar edilmiş ve simülasyon sonuçlarının deneysel veriler ile uyum içinde olduğu gözlemlenmiştir [17]. BRY yakıt için geliştirilen kimyasal kinetik mekanizma şok tüpü, laminer alev hızı ve HCCI bir motorda deneysel veriler ile analiz sonuçları kıyaslanmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde geliştirilen mekanizmanın iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [18]. Düşük eş değeri oranlarında çalışan bir HCCI motorun silindir içi yanma analizleri çok boyutlu KIVA3V-MZ-MPI yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölü hacimdeki artık yakıtlar ve sıcaklığa etkileri ve bunun yanında yakıtın ne kadar kısmının yanmadan atıldığı ortaya konulmuştur [19].

Literatürdeki çalışmalarda genellikle silindir içi yanma simülasyonlarının tek bir simülasyon aracı için doğruluğunun tespiti için yapıldığı görülmüştür. Fakat birbirlerine göre üstünlükleri bilinen farklı modelleme tekniklerinin aynı olayın modellenmesinde birbirlerine göre olan durumları üzerine sınırlı sayıda çalışmanın olduğu anlaşılmaktadır. Bu sebeple iki farklı yakıt ve farklı hava fazlalık oranları için HCCI motorda yapılan deneysel çalışmalar, birbirlerinden farklı yöntemlerle modelleme yapan iki farklı yazılım kullanılarak simüle edilmiştir. Her iki modelleme tekniğinin performansları elde edilen veriler kullanılarak incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL VE MODELLEME PARAMETRELERİ (EXPERIMENTAL AND MODELLING PARAMETERS)

Deneysel çalışmalar İngiltere'de bulunan Shell laboratuvarında tek silindiri, 4 valfli, eğimli çatılı silindir kafasına sahip deneysel Ricardo Hydra motorunda yapılmıştır. Motor özellikleri Tablo 1 de ayrıntılı olarak verilmiştir. Deneysel kurulumda HCCI şartlarını yakalayabilmek için piston tepesi yükseltılarak sıkıştırma oranı 14.04 değerine getirilmiş ve silindir içine giriş sıcaklık değeri ise 80 °C ve silindire alınan havanın basıncı da 2 bar'a yükseltilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada emme manifoldundan silindir içine giren havanın basıncı 2 bar ve hava fazlalık katsayısı (HFK) değerleri ise değiştirilerek ön karışım odasında hava yakıt karışımı hazırlanmıştır.

Deneysel çalışmada yakıt karışımı test edilmiştir. BRY-85 %85 iso-oktan ve %15 n-heptan karışımından oluşmaktadır. BRY yakıtın yanmasını kimyasal olarak modelleyebilmek için Tsurushima tarafından geliştirilen 33 bileşen ve 38 reaksiyon içeren BRY kimyasal kinetik mekanizması kullanılmıştır [20].

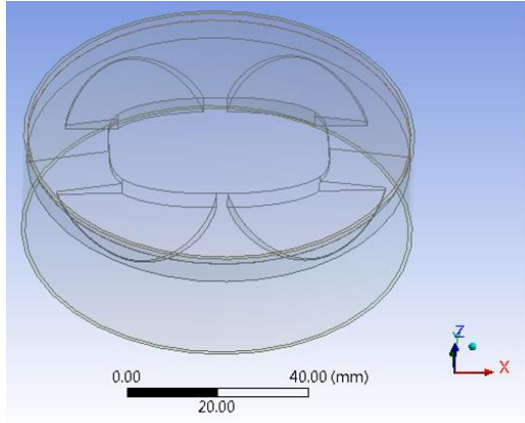
Tablo 1. Motor parametreleri (Engine Parameters)

Parametre	Değer	Birim
Silindir çapı	86	mm
Strok	86	mm
Biyel kolu uzunluğu	143.5	mm
Sıkıştırma oranı	14.04	-
Motor devri	1200	dev/dak
Toplam valf sayısı	4	-
Emme valfi açılma zamanı	340 ÜÖNÖ	<sup>0</sup> KMA
Emme valfi kapanma zamanı	108 ÜÖNÖ	<sup>0</sup> KMA
Egzoz valfi açılma zamanı	120 ÜÖNS	<sup>0</sup> KMA
Egzoz valfi kapanma zamanı	332 ÜÖNS	<sup>0</sup> KMA

SRM simülasyonları SRM Engine Suite V7.3. ile yapılmıştır. SRM yazılımında analizler tablo 1'de verilen deneysel şartlar değiştirilmeden kullanılarak gerçekleştirilmiştir. SRM yazılımında gerçekleştirilen analizler emme valfi kapanma zamanı (EVK) ile egzoz valfi açılma (EVA) zamanlarını kapsamaktadır. Başlangıç koşulları olarak EVK zamanındaki basınç ve sıcaklık değerleri kullanılmıştır. Deneysel şartlardaki yakıt karışımı kütleli olduğu için SRM yazılımında da karışım değerleri kütleli oranlar kullanılarak girilmiştir. Stokastik partikül miktarı ise 300 olarak ayarlanmıştır. Çözüm için adım aralığı 0.1 krank mili açısı (KMA) olarak alınmıştır. Stokastik partikül ağırlık faktörü ise 12 olarak alınmıştır. Türbülans model olarak lokal karışım modeli kullanılmış ve sayısal değer olarak 0.005 s alınmıştır. Çeperlerden gerçekleşen ısı transferi için duvar sıcaklığı sabit 430 K olarak yazılıma girilmiştir. SRM yazılımında kullanılan başlangıç ve sınır koşulları HAD yazılımında da değiştirilmeden kullanılmıştır.

HAD simülasyonları ANSYS Fluent 14.0 ile yapılmıştır. Şekil 1'de görülen deneysel motorun piston üstü ve yanma odası geometrisi gerçek ölçüler kullanılarak ANSYS yazılımında bulunan Design Modeller modülü kullanılarak çizilmiş ve çizilen 3 boyutlu CAD model HAD analizlerinde kullanılmıştır. HAD simülasyonlar emme valfi kapanma zamanından (EVK) egzoz valfi açılma (EVA) zamanına kadar sürdürüldüğü için 3

boyutlu modele valf geometrisinin eklenmesine ihtiyaç duyulmamıştır. Bu sebeple HAD analizinde SRM modelinde olduğu gibi başlangıç koşulu olarak yakıtla yanma havasının tam homojen bir karışım halinde bulunduğu kabul edilmiştir. Bu durum deneysel çalışma ile de örtüşmektedir çünkü deneysel sistemde hava ile yakıt karışımı ön karışım odasında hazırlanıp silindir içerisine emme supapından içeri alınmaktadır. Silindir ile piston arasında kalan ve krevis olarak isimlendirilen hacimde ayrıca modele eklenmiştir. Bu bölgede, gerçekte olduğu gibi bir miktar yakıtın yanmadan kalacağı ve HAD simülasyonunun gerçekçiliğini arttıracığı düşünülmüştür. Tam modelin oluşturulmasında en büyük etken piston yüzeyinin farklı bir geometrik yapıya sahip olmasıdır. Bu durum analiz süresini ciddi ölçüde arttırsa da analiz sonuçlarına önemli bir katkıda bulunacağı bilinmektedir.



Şekil 1. Silindir hacminin CAD modeli (CAD Model of Cylinder Volume)

HAD analizlerinde en fazla dikkat edilmesi gereken şeylerden biri de ağ yapısı modelidir. Ağ yapısı ne kadar düzenli ve yeterli sayıda olursa yapılan analiz de o kadar sağlıklı ve güvenilir olmaktadır. Elbette çözüm süresi çok önemli bir faktördür ve bu yüzden oluşturulacak ağ yapısının analizin olabildiğince yakınsamasını sağlayacak ölçüde yeterli, çözüm süresini de en aza indireyecek kadar az olması sağlanmalıdır. Bu çalışmada yapılan analiz zamana bağlı çözümlerden oluşmaktadır. Zamana bağlı ve dinamik ağ yapısı kullanılarak yapılan analizler toplam çözüm süresini çok büyük boyutlara taşımaktadır. Ayrıca HAD çözümüne kimyasal kinetik mekanizmalar gibi ek çözümler de eklendiğinde bu süre mekanizmaların büyüklüğüne göre katlanarak artmaktadır. Şekil 2’de modeli hazırlanmış silindir içi geometrisinin ağ yapısı görülmektedir. Ağ yapısı piston üst ölü

noktada (ÜON) iken oluşturulmuştur. Daha sonra HAD yazılımında dinamik ağ yapısı oluşturularak piston istenen KMA’ya çekilebilmektedir. Toplam hücre sayısı piston ÜON da iken 34000 adet ve alt ölü noktada iken 70795 adettir. Model, eğriler ve düzensiz hacimlerden oluştuğu için piston üstü hacminde prizma, diğer hacimler ise dörtgen ve düzenli ağ yapılarına sahiptir. Şekil 2’de farklı açılardan ve kesitlerden bu yapılar görülmektedir. Dinamik modelin düzgün çalışabilmesi için dörtgen ve düzenli ağ yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Piston üstü bölgesinin geometrisi düzenli ağ yapısı oluşturulamayacak düzeyde karmaşık bir geometriye sahip olduğu için piston üst bölgesi hacminin küçük bir kısmına üçgen ve dörtgen ağ yapısı oluşturulmuş. Geri kalan hacimlere ise daha düzenli ve dörtgenlerden oluşan ağ yapısı uygulanmıştır. Oluşturulan bu ağ yapıları çözüm optimizasyonunda dikkate alınarak mümkün olan minimal düzeye çekilmeye çalışılmıştır.

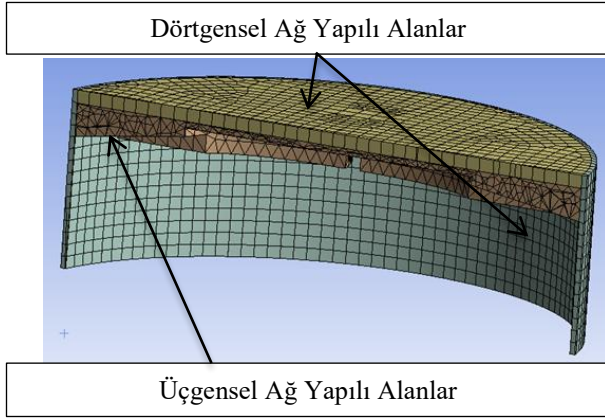
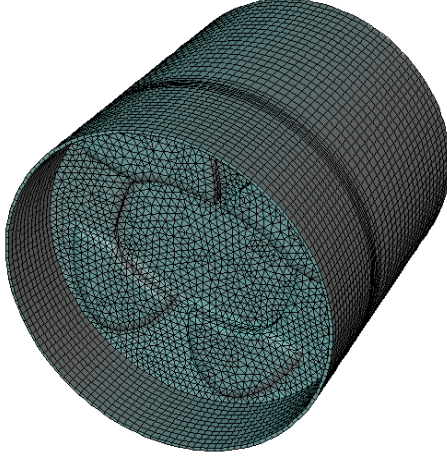
### 3. ANALİZ VE DENEYSEL VERİLERİN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF EXPERIMENTAL AND ANALYSES DATA)

HCCI motorda 4 farklı hava fazlalık katsayısı için yapılan analizler ve deneysel olarak ölçülen basınç, ısı yayılım oranı ve yanma sonu meydana gelen CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> emisyon yüzdeleri kıyaslanmıştır. HFK için sırasıyla; 4.1, 4.5, 4.75 ve 5 değerleri göz önüne alınarak simülasyonlar yapılmıştır. Şekil 3’de 4 farklı HFK değeri için basınç eğrileri verilmiştir. Basınç eğrileri incelendiğinde HFK 5 için deneysel basınç eğrisinin HAD analizi ile uyumlu olduğu fakat SRM analizinde yanmanın erken başlamasından kaynaklı olarak basıncın erken artmaya başladığı görülmektedir. Diğer basınç eğrileri incelendiğinde deneysel ve analiz sonuçlarının birbiri ile örtüştüğü gözlemlenmiştir. HAD simülasyonlarında toplam çözüm süresi yaklaşık 140 saat/CPU (7 CPU çalıştırılmıştır yaklaşık 20 saat sürmüştür) sürer iken, SRM simülasyonlarında aynı çalışma için bu süre 8 saat/CPU (8 CPU çalıştırılmıştır yaklaşık 1 saat sürmüştür).

Şekil 4’de 4 farklı HFK değeri için elde edilen ısı yayılım oranı grafikleri mevcuttur. Isı yayılım oranı verileri için çizilen her bir grafikte görüldüğü üzere soğuk yanma olarak isimlendirilen ve -25 ve -15 KMA arasında ortaya çıkmış olan bölge için tam olarak deneysel değerlere ulaşmadığı ama yine de yanmanın olduğu bölgelerde deneysel

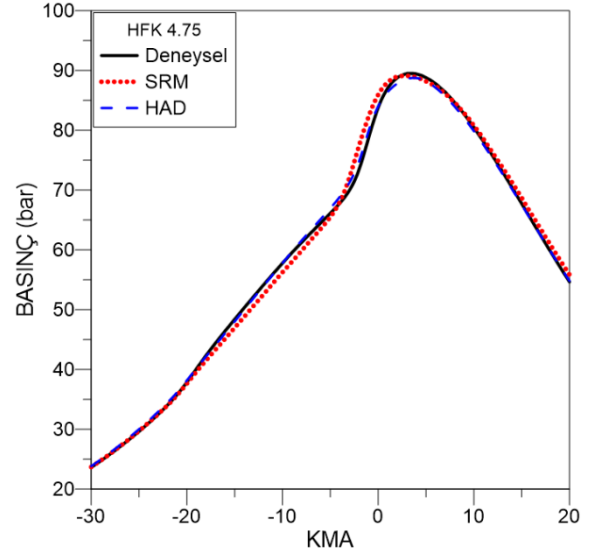
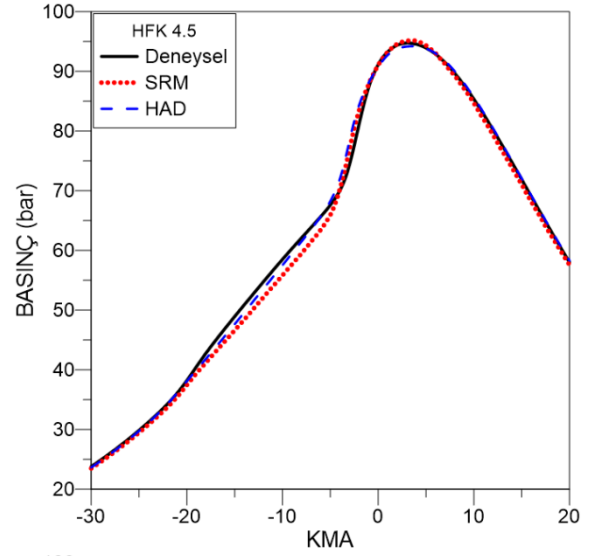
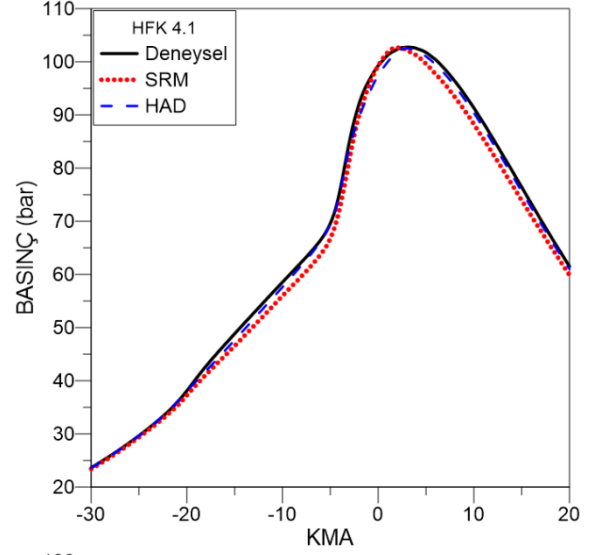


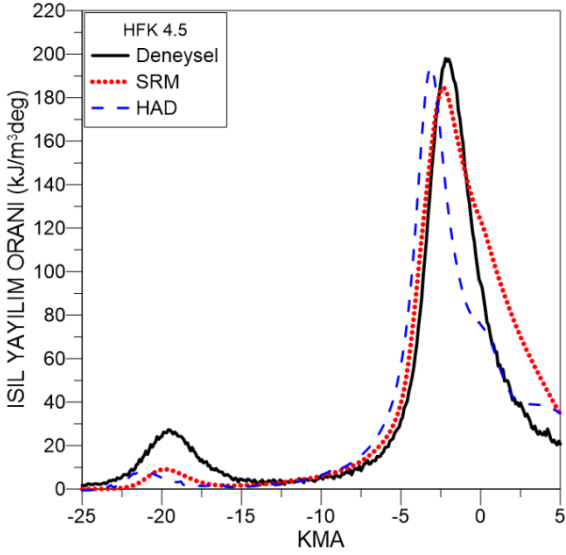
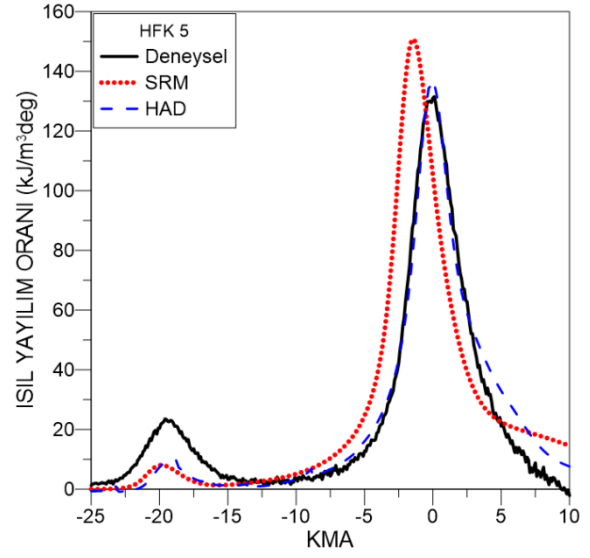
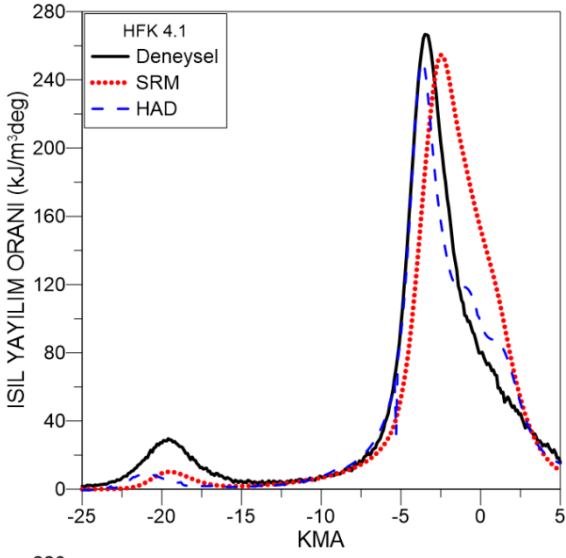
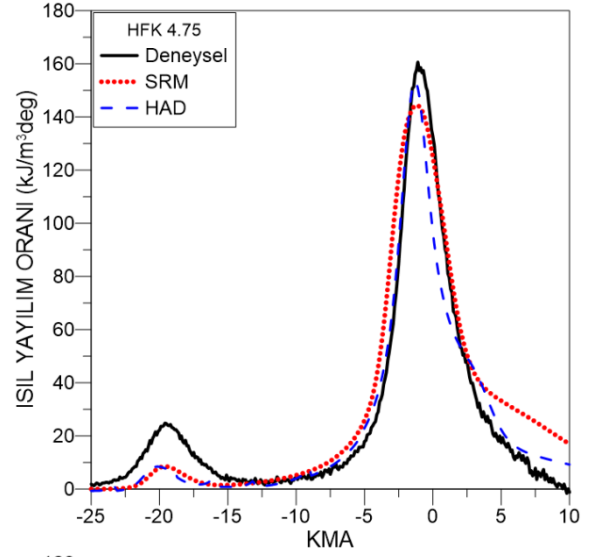
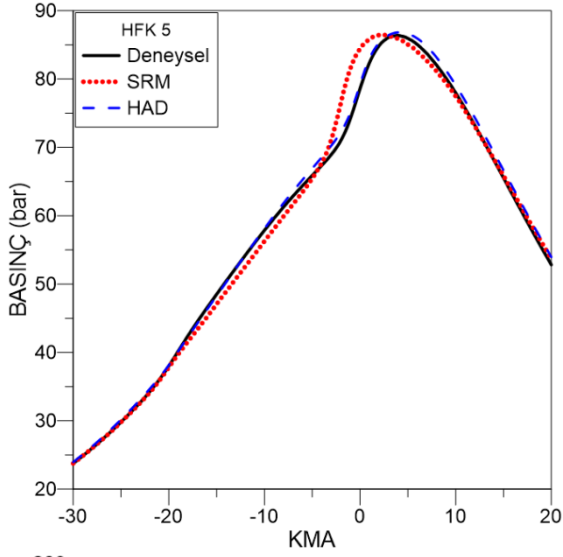
eğrilere çok daha iyi yakınsamanın ortaya çıktığı görülmektedir. HFK 5 için elde edilen veriler incelendiğinde HAD analizi sonuçlarının deneysel veriler ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır. Fakat SRM analizinde yanmanın erken başlamasından kaynaklı olarak ısı yayılım grafiğinden anlaşıldığı üzere maksimum noktanın daha yüksek ve daha erken KMA’da ortaya çıktığı görülmektedir.



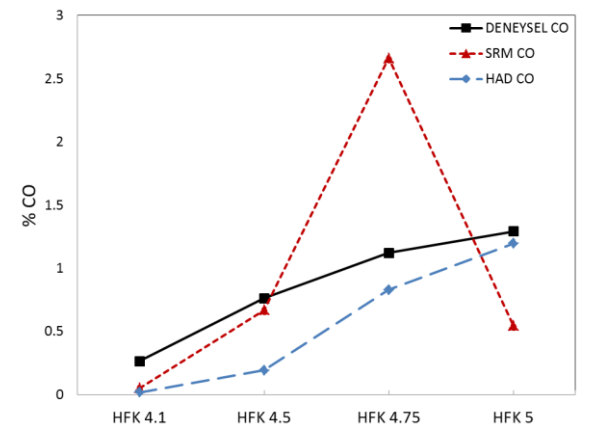
Şekil 2. Piston alt ölü noktada iken ağ yapısının görüntüsü (üstte), piston üst ölü noktada iken ağ yapısının görüntüsü (altta), (view of mesh when the piston at the bottom dead center (top), view of mesh when the piston at the top dead center (bottom))

Şekil 5’de 4 farklı HFK değeri için CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> yanma sonu ürünlerde yüzdesel değer grafikleri mevcuttur. Emisyon grafikleri incelendiğinde 4 farklı HFK için deneysel veri ile genel olarak aynı artış ve azalış eğilimde olduğu anlaşılmaktadır. Fakat CO emisyonu verilerinde HFK 4.75 ve 5 için SRM yazılımından elde edilen sonuçların ani artış ve azalış eğilimde olduğu ve bu nedenle diğer sonuçlara göre daha uyumsuz olduğu anlaşılmaktadır.

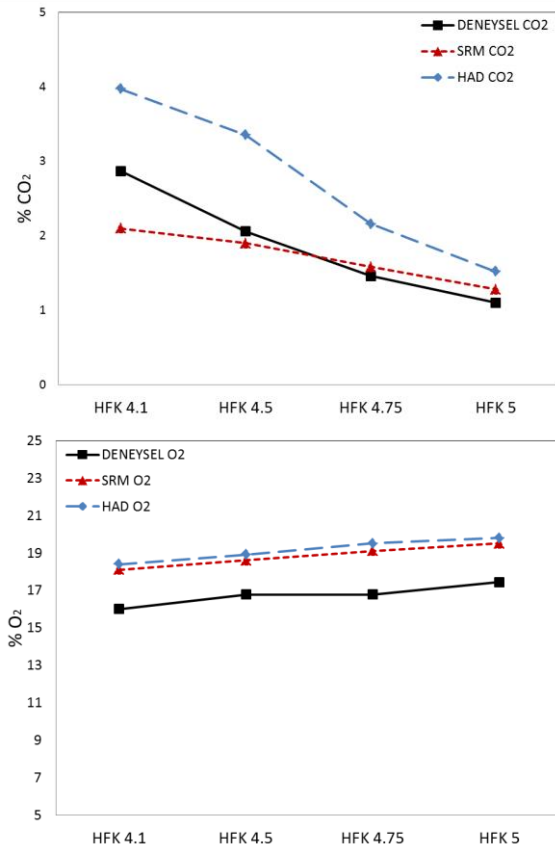




Şekil 4. Deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen ısı yayılım oranı değerinin kıyaslanması (Comparison of the heat release rate results of simulation and experimental studies)



Şekil 3. Deneysel ve simülasyon çalışmalarının basınç eğrilerinin karşılaştırılması (Comparison of the pressure curves of experimental and analysis studies)



Şekil 5. Deneysel ve simülasyon çalışmalarından elde edilen CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> emisyonlarının yüzdesel değerinin kıyaslanması (Comparison of the CO, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> emissions percentage results of simulation and experimental studies)

Genel eğilim incelendiğinde HFK artması sonucu karışımın fakirleşmesi nedeniyle CO<sub>2</sub> emisyonu azalmaya başladığı, CO emisyonunun artmaya başladığı ve O<sub>2</sub>'nin yanma sonu ürünlerdeki değerinin arttığı anlaşılmaktadır. Bu durum HFK artması ile yanmanın tam olarak gerçekleşme oranının azaldığı anlamına gelmektedir.

HCCI motorun çalışma koşulları tam homojen olacak şekilde, yani ön karışım odalı bir tasarıma sahiptir. Bu sebeple yanma anında maksimum ortalama sıcaklık 1600 K'ni geçmemiştir ve NO<sub>x</sub> oluşumu silindir içi yanma olayında 1800 K civarında yoğun miktarda oluşmaya başladığı bilinmektedir. Deneysel ölçüm cihazının ölçüm aralığının altına NO<sub>x</sub> emisyonu oluştuğu için ölçüm yapılamamıştır. Deneysel veri olmadığı için simülasyon çalışmalarından elde edilen NO<sub>x</sub> verileri çalışmaya eklenmemiştir.

#### 4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (RESULT AND CONCLUSIONS)

Silindir içi yanma modelinde asıl amaç silindir içinde piston alt ölü noktada iken hali hazırda bulunan hava-yakıt karışımının sıkışma esnasında

nasıl bir yanma rejimi izlediğinin ve emisyonlara nasıl etki ettiğinin incelenmesiydi. Bu çalışmada yanma sonucu silindir içinde oluşan basınç, ısı yayılım oranı ve yanma sonu ürünlerde bulunan CO, CO<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> deneysel basınç verileri ile karşılaştırılması hedeflendi. İki farklı yakıt ve her birinde 4 farklı hava fazlalık katsayısı değeri için SRM ve HAD analizleri ile deneysel ölçüm sonuçları her bir veri için karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

- Yapılan bu çalışmada motorun HCCI modunda olması yani motorun ön karışımli olarak kullanılması ile yanma verimliliğinde artış sağlanırken emisyonlarda ise azalış olduğu bilinmektedir fakat HFK çok artması ile karışımın çok fakirleşmesi nedeniyle yanmanın kötüleştiği deneysel ve simülasyon çalışmaları sonucunda anlaşılmıştır.

- Deneysel basınç, emisyon ve ısı yayılım oranı grafikleri ile SRM ve HAD simülasyon sonuçlarının genel olarak uyumlu olduğu fakat HFK artması ile yanma kalitesinin düşmesi sonucu simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle uyumunun azaldığı görülmektedir.

- SRM Suite programı 0-boyutlu yanma analizi yapmasına rağmen HCCI motorun deneysel verilerine çok yakın sonuçlar verdiği ve HAD analizleri kadar iyi çözüm performansına sahip olduğu anlaşılmaktadır.

- SRM yazılımında büyük kimyasal mekanizmaların kullanılabilmesi ve analiz süresinin de HAD yazılımlarına göre oldukça kısa olması, silindir içi yanma simülasyonları için büyük bir avantaj sağlayabileceğini göstermektedir.



Yukarıdaki açıklamalara ek olarak daha önce yapılan çalışmalarda [4] [21] SRM yazılımının HCCI yanması performansı ile 0 boyutlu yanma simülasyonu yapan bir yazılımın performansı karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar SRM yazılımının diğer yazılıma göre deneysel verilere çok daha iyi yakınsadığını göstermiştir.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] J. C. G. Andrae, T. Brinck ve G. T. Kalghatgi, «HCCI experiments with toluene reference fuels modeled by a semidetalled chemical

- kinetic model,» *Combustion and Flame*, cilt 155, no. 4, pp. 696-712, 2008.
- [2] «CMCL Innovations,» [Çevrimiçi]. Available: <http://www.cmclinnovations.com/>. [%1 tarihinde erişilmiştir22 01 2015].
- [3] M. Kraft, P. Maigaard, . F. Mauss, . M. Christensen ve . B. Johansson, «Investigation of combustion emissions in a homogeneous charge compression injection engine: Measurements and a new computational model,» *Proceedings of the Combustion Institute*, cilt 28, no. 1, pp. 1195-1201, 2000.
- [4] U. Demir, N. Yılmaz, G. Coskun ve H. S. Soyhan, «Evaluation of zero dimensional codes in simulating IC engines using primary reference fuel,» *Applied Thermal Engineering*, cilt 76, pp. 18-24, 2015.
- [5] P. Maigaard, F. Mauss ve M. Kraft, «Homogeneous Charge Compression Ignition Engine: A Simulation Study On The Effects Of Inhomogeneities,» *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, cilt 125, no. 1, pp. 466-471, 2003.
- [6] A. Bhave, M. Balthasar, M. Kraft ve F. Mauss, «Analysis of a natural gas fuelled homogeneous charge compression ignition engine with exhaust gas recirculation using a stochastic reactor model,» *International Journal of Engine Research*, cilt 5, no. 1, pp. 93-104, 2004.
- [7] S. Mosbach, M. Kraft, A. Bhave, F. Mauss, J. H. Mack ve R. W. D. Dibble, «Simulating a homogenous charge compression ignition engine fuelled with a DEE/EtOH blend,» *SAE Technical Paper*, no. 2006-01-1362, 2006.
- [8] A. Turkcan, A. N. Özsezen, M. Çanakçı, G. Coşkun, H. S. Soyhan ve U. Demir, «An Experimental And Modeling Study To Investigate Effects Of Two-Stage Direct Injection Variations On HCCI Combustion,» *Combustion Science And Technology*, cilt 187, no. 4, pp. 642-658, 2015.
- [9] S. Mosbach, H. Su, M. Kraft, A. Bhave, F. Mauss, Z. Wang ve J.-X. Wang, «Dual injection HCCI engine simulation using a stochastic reactor model,» *International Journal of Engine Research*, cilt 8, no. 1, pp. 41-50, 2007.
- [10] A. M. Aldawood, S. Mosbach ve M. Kraft, «HCCI combustion phasing transient control by hydrogen-rich gas: Investigation using a fast detailed-chemistry full-cycle model,» *SAE*, Detroit, 2009.
- [11] J. E. Etheridge, S. Mosbach, M. Kraft, H. Wu ve N. Collings, «A detailed chemistry multi-cycle simulation of a gasoline fueled HCCI engine operated with NVO,» *SAE Technical Paper*, no. 2009-01-0130, 2009.
- [12] S. Mosbach, M. Aldawood ve M. Kraft, «Real-time evaluation of a detailed chemistry HCCI engine model using a tabulation technique,» *Combustion Science and Technology*, cilt 180, no. 7, pp. 1263-1277, 2008.
- [13] S. Mosbach, . M. S. Celnik, A. Raj, M. Kraft, H. R. Zhang, S. Kubo ve . K.-O. Kim, «Towards a detailed soot model for internal combustion engines,» *Combustion and Flame*, cilt 156, no. 6, pp. 1156-1165, 2009.
- [14] L. Cao, H. Su, S. Mosbach, M. Kraft ve A. Bhave, «Studying the influence of direct injection on PCCI combustion and emissions at engine idle condition using two dimensional CFD and stochastic reactor model,» *SAE Technical Paper*, no. 2008-01-0021, 2008.
- [15] A. Yousefia, A. Ghareghania ve M. Biroukb, «Comparison study on combustion characteristics and emissions of a homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine with and without pre-combustion chamber,» *Energy Conversion and Management*, cilt 100, pp. 232-241, 2015.
- [16] S. Jafarmadar, P. Nemati ve R. Khodaie, «Multidimensional modeling of the effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on exergy terms in an HCCI engine fueled with a mixture of natural gas and diesel,» *Energy Conversion and Management*, cilt 105, pp. 498-508, 2015.
- [17] G. Coskun, . M. Jonsson, J. Bood, . M. Tunér, . M. Algotsson, . B. Li, Z. Li, . H. S. Soyhan, M. Aldén ve . B. Johansson, «Analysis of in-cylinder H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and HO<sub>2</sub> distributions in an HCCI engine – Comparison of laser-diagnostic results with CFD and SRM simulations,» *Combustion and Flame*, cilt 162, no. 9, pp. 3131-3139, 2015.

- [18] X. Zhen, . Y. Wang ve . D. Liu, «A new improvement on a chemical kinetic model of primary reference fuel for multi-dimensional CFD simulation,» *Energy Conversion and Management*, cilt 109, pp. 113-121, 2016.
- [19] R. P. Hessel, D. E. Foster, S. M. Aceves, M. L. Davisson, F. Espinosa-loza, D. L. Flowers, W. J. Pitz, J. E. Dec, M. Sjöberg ve A. Babajimopoulos, «Modeling iso-octane HCCI using CFD with multi-zone detailed chemistry; comparison to detailed speciation data over a range of lean equivalence ratios,» *SAE Technical Paper*, no. 2008-01-0047, 2008.
- [20] T. Tsurushima, «A new skeletal PRF kinetic model for HCCI combustion,» *Proceedings of the Combustion Institute*, cilt 32, pp. 2835-2841, 2009.
- [21] G. Coskun, U. Demir, N. Yilmaz ve H. S. Soyhan, «Investigation of performance of 0-D internal combustion engine simulation codes based on detailed and reduced chemical kinetic mechanisms,» *Int. J. Vehicle Design*, cilt 71, no. 1, pp. 377-388, 2016.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 10.08.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 06.02.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.298938	

## Typical cracks in deck of ship-shaped structures and ways to modify and improve the design

Özgür Özgüç\*<sup>1</sup>

### ABSTRACT

Cracks occurred in main deck structure around openings due to pipe penetrations, deckhouses and supports for various equipments have created a major problem and mainly related to the vessels with made of high strength steel material in deck and most frequently found on oil tankers used by buoy loading. This paper will show typical cracks and give guidance on modifications of existing details and examples of good design, where the examples of defects are used from Classification Societies' feedbacks in hull in operation phase. Any discontinuity or opening in deck as well as attachments to deck has been a problem for years and experience shows that it is difficult to find 100% solutions. The purpose of this paper is therefore not to guarantee perfect solutions but is a selection of good solutions that has proved to be better than most. To avoid cracks in deck completely is not guaranteed and is probably not possible. This paper aims to address with a particular attention on oil tankers but will also be relevant to other vessel types including ship-shaped floating offshore structures such as FSO (Floating Storage Offloading), FPSO (Floating Production Storage Offloading), FLNG (Floating Liquefied Natural Gas) and drill-ships.

**Keywords:** outfitting, structural defect, local reinforcement, shipyard standard, repair process, welding

### Gemi formundaki yapıların güvertelerinde sıklıkla karşılaşılan çatlaklar ve dizaynı düzeltme ve geliştirme yolları

### ÖZ

Boru geçişleri, güverte evleri ve çeşitli ekipmanların destekleri boyunca güverte kaplamasında karşılaşılan çatlaklar; artan bir problem olmaktadır ve sıklıkla güvertesinde yüksek mukavemetli çelik kullanılan teknelerde karşılaşılmakta olup, en büyük sıklıkla duba yükleme yapan petrol tankerlerinde karşılaşılmaktadır. Bu çalışmada; sıklıkla karşılaşılan çatlakları sunmakta olup, kusur örneklerinin Klas Kuruluşlarının, kullandığı gemilerden elde ettikleri geri bildirimlerinden sağlandığı, mevcut detayların düzeltilmesi ve iyi dizayn örnekleri hakkında kılavuz sunmaktadır. Güvertedeki her türlü süreksizlik ya da açıklık ve aynı zamanda güverte eklentileri, yıllardır bir problem olarak karşımıza çıkmakta olup, deneyimlerin gösterdiği kadarıyla bu soruna %100 çözüm bulmak zor olmaktadır. Buna bağlı olarak bu dokümanın amacı; mükemmel çözümleri garanti etmek olmayıp, çoğundan daha iyi olduğu

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Istanbul Technical University, Turkey

kanıtlanmış olan iyi çözümlerin bir seçimidir. Güvertedeki çatlaklardan tamamıyla korunmak garanti edilmemekte olup muhtemelen mümkün de değildir. Bu çalışma; özellikle petrol tankerleri üzerine odaklanarak hazırlanmış olup, FSO (Yüzer depolama ve nakil amaçlı açık deniz yapıları), FPSO (Yüzer üretim, depolama ve nakil amaçlı açık deniz yapıları), FLNG (Yüzer sıvılaştırılmış doğal gaz tesisi) gibi gemi formunda yüzer açık deniz yapılarını ve tarama gemileri dahil diğer tekne tipleri ile de ilgili olacaktır.

**Keywords:** donatım, yapısal kusur, yerel güçlendirme, tersane standard, tamir işlemi, kaynak

## 1. INTRODUCTION

Normally outfitting reinforcements are being designed to consider the static loads acting on the outfitting parts. Reinforcements installed underneath deck structure are fit particular for this aim, where smooth transfer is targeted. Any stress concentrations (SC) induced by local reinforcement plan have to be taken into account and considered in design phase. Hard points such as corners and geometric discontinuities must be avoided [1].

Since the reinforcement underneath outfitting are covered in the vessel structure they will also be exposed to combine loads such as hull girder load, sea and tank pressure load, vibration load, etc. In normal yard practice outfitting reinforcements are in general not checked versus those loads and shipyard standard and/or industry recognized practice so that they conservatively deal with vessel loads. This covers suitable connection details of the reinforcement to the hull structure and/or effective modification of the vessel structure around the outfitting parts [5]. Qualified workmanship has a crucial impact since poor fabrication or poor welding can result in structural failure even for a successful design. The work for outfitting might not be carried out by same working manner as structure work and training of the outfitting workers in terms of quality is so crucial [2].

The process for converted, new-built and repaired vessels has different difficulties, in which design can easily be modified at the design stage to select the most efficient as well as cost-effective configuration, compromises have to be performed at the repair stage so as to minimize the required changes and make repair workable and reliable for working on-board

where access ways, weight items, etc are important items.

In order to describe the defects found on board vessels and find general categories of defects, it is firstly defined a typical characterization framework that is;

- Category: Design or Construction & Installation.

Design related issues are when ship structures have not been designed to accommodate the load transferred by outfitting items: such failures can be attributed to poor design, poor detail, lack of use of recognized standards for outfitting or poor management of changes, incorrect materials, etc. Construction & Installation related issues are when the source of problem is poor workmanship, misalignment, or incorrect materials compared to the drawings.

- Type of defect: Cracking, Fractures or Deformation, Collapse
- Cause of defect: a defect detailed description
- Area: the location of the defect primarily if it is located in the 0.4L main deck area

This study attempts to address typical cracks shown on the ship and offshore units and recommend guidance upon modifications of existing details and examples of good design, where the examples of defects are used from Classification Societies' feedbacks in hull in operation stage.

A particular attention is paid to oil tankers but will also be relevant to other vessel types including ship-shaped floating offshore structures such as FSO (Floating Storage Offloading), FPSO

(Floating Production Storage Offloading), FLNG (Floating Liquefied Natural Gas) and drill-ships.

## 2. SHIPYARD STANDARDS

Plan approval mainly focuses on primary structure and may consider reinforcement underneath and around outfitting “shall be according to shipyard practice”. Typical reinforcements underneath and in way of outfitting are specific for each shipyard. There are few recognized industry standards. Generally, shipyard standards are not submitted to the classification society for approval. The ship-owner should request the shipyard standards for review and comment, as part of his building contract.

According to class rules some main equipment reinforcements are subject to specific approval. With reference to CSR for Double Hull Oil Tankers as given by Sec. 11 / 3 Support structure and structural Appendages: “3.1.1.2 this subsection covers scantling requirements for the supporting structure and foundations of the following items of the equipment and corresponding fittings [3]:

- a) Deck shipboard cranes, derricks and masts
- b) Emergency towing brackets
- c) Anchor windlasses
- d) Anchoring chain stoppers
- e) Mooring winches
- f) Bollards and bits, chocks, fairleads, stand rollers, and capstans
- g) Other deck equipments and fittings which are subject to specific approval
- h) Miscellaneous deck fittings which are not subject to specific approval

Equipment and fittings whose support structures have to be approved are well identified but equipment and fittings under (g) and (h) are unspecified. Owners should discuss and agree the extent of drawings for approval with the shipyard and this should include reinforcements in way of outfit items.

## 3. DESIGN AND PLAN APPROVAL

Ship basic design for hull structure normally precedes outfitting installation design. Hull structure design documents for approval might not cover all necessary reinforcements underneath and around outfitting. Further late modifications and changes might not be reflected to vessel structural detail design such as underdeck members. While CSR does require the details for fabrication standard details to be supplied for approval and review this normally does not cover outfitting supports (CSR OT Sect 4/3) [3].

During design plan approval the ship operator / owner should ask the yard to provide the drawings of outfitting arrangement such as supports for piping, electrical, HVAC, mooring fittings, deck attachments, openings, etc. Reproducing of the drawings is more helpful from cost effective perspective compared to changing the structure already fabricated.

The building contract should have provisions for management of changes to design and approved plans. For example, comment such as “any modification of the approved drawing is subject to approval” is usually made to give the owner the opportunity to review all yard changes during production [5].

## 4. INSPECTION

Since the underneath reinforcement and around outfitting structure might not be on the operator / owner’s plans, the only chance to verify the compliance with the outfitting drawings is during survey. The survey should not just concentrate on the compliance with approved documents and drawings but should also pay attention to the outfitting drawings.

During the hull block survey time the outfitting reinforcement might already be installed, hence the surveyor has the chance to check compliance of the reinforcement with the outfitting drawings [8, 9]. When outfitting items are fitted at a later stage, the final survey of the outfitting parts and relevant reinforcement hull structure can be performed at the outfitting survey. Whenever feasible, the outfitting surveys should be carried out at the hull block stage. The outfittings have to



be supported by underneath structure. Patrol surveys are also useful road map to check out the compliance [2].

The operator / owner`s outfitting surveys should cover the following checks for;

- Used material grade and sizing,
- Missing supporting structure,
- Fabrication misalignments,
- Non-completed and undersize welds,
- Mis-cuts,
- Correct surface treatment and painting,
- Corrosion protection,
- Interferences.

## 5. DAMAGE TYPES AND PROPOSED MODIFICATIONS

This guide identifies the influential parameters and provides guidelines on improvement of structural connections with respect to outfitting design. It also provides reference illustrations of local structural failures experienced in some existing tankers and the corrective measures as compiled by the Tanker Structure Cooperative Forum and from Classification Societies` data files [1, 4].

### 5.1. Pipe Penetrations

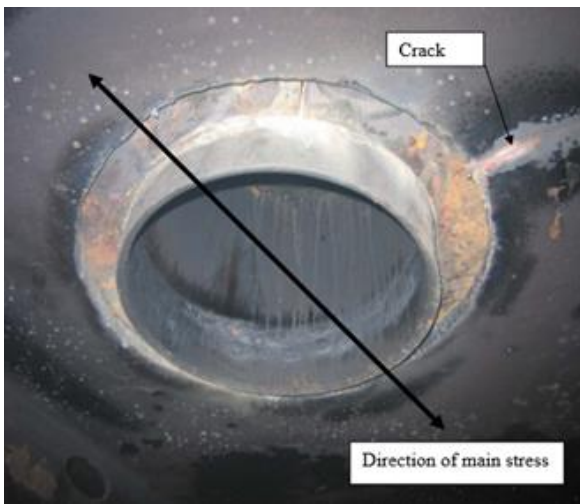


Figure 1. Crack in way of pipe penetration in main deck [1].

Figure 1 shows inert gas pipe with a doubler plate that is welded on the deck top only. The hole in

main deck has been cut with an oxy-acetylene torch leading to in a very rough edge. This could be very relevant case on how not to design it. The rough cut edge has created a crack to propagate and this likely occurred very quickly. The edge is supposed to cut correctly and the edge should be flush ground at all around. An insert plate would be a better way for a good solution [4]. The best design for a pipe that does not actually need to protrude through the deck, especially if access below deck is tough, is the “improved design” shown on Figure 2.

It should be stressed out that a doubler plate should always be welded through both sides and not like above where the underside is not welded.

In machinery space typical transverse bulkheads, etc the doubler plate application is feasibly acceptable on condition that both sides are welded but on main deck structure in the cargo hold area that it is not advised.

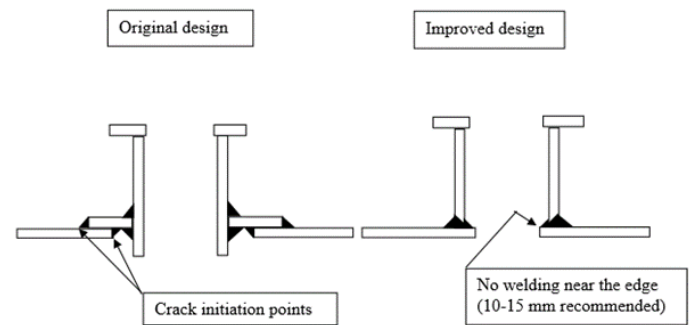


Figure 2. Sketches of damage and repair for pipe penetration.



Figure 3. Crack in way of opening in deck [1].

Figure 3 shows a scupper pipe in main deck and although difficult to say how it was welded, it is probably that the welding has been close to the edge of opening. A rough cut opening is also a possible reason for the crack, although on the picture that it looks OK.

Once again the opening should be cut out correctly and smooth flush ground. Welding on or near the edge is not advised.



Figure 4. Crack in way of pipe penetration in main deck [2].

Figure 4 shows pipe penetration for heating coils. The picture on the left shows a doubler plate on the main deck top with the pipes going through the doubler. To add to the problems the cut out in deck is oriented in the transverse direction.

Photograph on the right shows repair using insert plate, which is much better than doubler welded on top. The latter should only be used in machinery space and aft and forward structure where longitudinal stresses induced by hull girder load are not a concern.

In this case, the risk of cracks would be reduced if the opening was cut out in the longitudinal direction, as the effective loss of deck area is less.

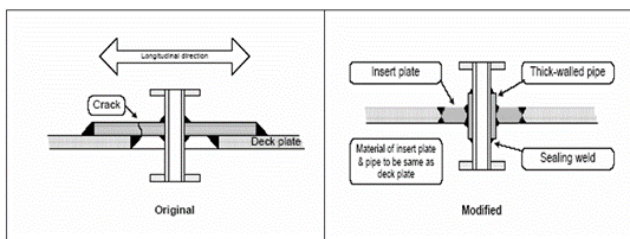


Figure 5. Recommended sketches of damage and repair / modifications for pipe penetrations.

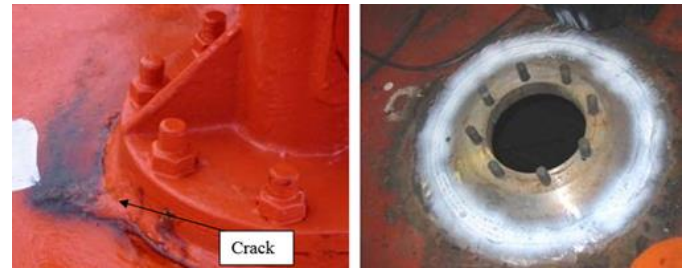


Figure 6. Crack in way of pipe penetration in main deck [3].

Figure 6 shows a COW (Crude Oil Washing) machine connection flange to deck. A crack can be seen extending from underneath a doubler ring/flange probably due to rough-cut and lack of grinding of the hole in deck.

The repair on the right hand side shows a new flange/insert plate with increased thickness. In addition, the hole is machine-cut nice and smooth.

## 5.2. Deck openings

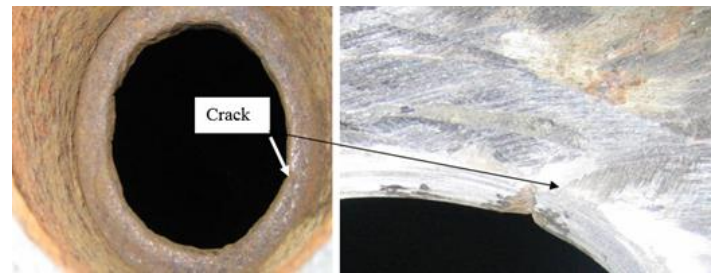


Figure 7. Crack in way of opening in deck.

Figure 7 shows a high-level alarm hole in deck. A pipe stub piece is welded to deck with hole in deck smaller than the pipe diameter. Photo on right hand side is taken after removal of pipe and grinding of the deck – crack is still visible. In this case a deck insert ring plate should be inserted to remove the crack before a new hole is cut, see sketch below. This will require back welding from below.

The method of welding a pipe stub or coaming to deck with a smaller cut hole in deck is the method we recommend, as all welding may be carried out from top side. It requires that the hole is cut properly (cut by oxy/acetylene torch is ok provided it is cut with a template or guide) and ground perfectly smooth. See also Figure 8 below.

If a crack occurs in a hole in deck, an insert needs to be fitted as shown Figure 8. This will require welding also from below.

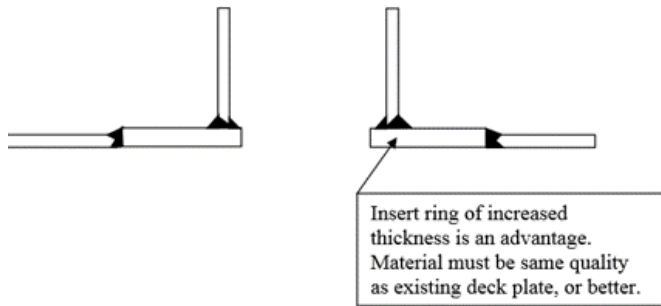


Figure 8. Recommended sketches for repair / modifications for insert ring.

### 5.3. Small deckhouses



Figure 9. Crack in way of deckhouse corner [1].

Figure 9 shows a crack at the corner of a deckhouse in the midship area. Recommended modification is to fit a longitudinal soft bracket with increased thickness and welded full penetration to deck. Toe should preferably be ground flush with deck as shown on Figure 10.

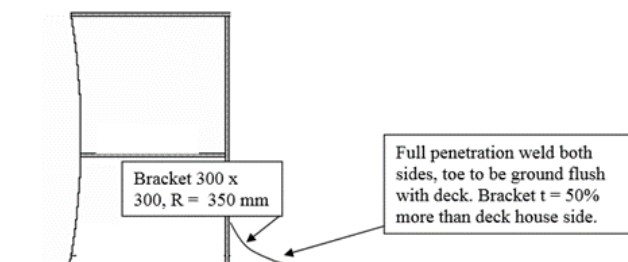


Figure 10. Recommended sketches for repair / modifications for deckhouse corner [5].



Figure 11. Cracks in gutter bar.



Figure 12. Cracks in gutter bar (in closed view).

The Panama Chock foundation top plate being attached to the gutter bar as shown by Figures 11 and 12 causes the crack. If at all possible, nothing should be welded to the gutter bar. If a Panama Chock foundation is welded to the gutter bar, nothing should be welded to the upper part of the gutter bar, i.e. in this case the foundation top plate should have been lifted to clear the top of the gutter bar. Hence, it would be better to have a continuous gutter bar.

Another possible solution is to use one of the designs shown on next page, see Figures 13 and 14. This may be used on both sides of Panama Chocks, bulwark etc. in the midship area.

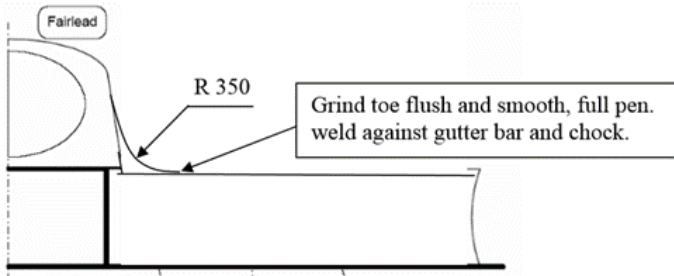


Figure 13. Design to improve the notch in the gutter bar. Bracket with minimum 15 mm thickness.

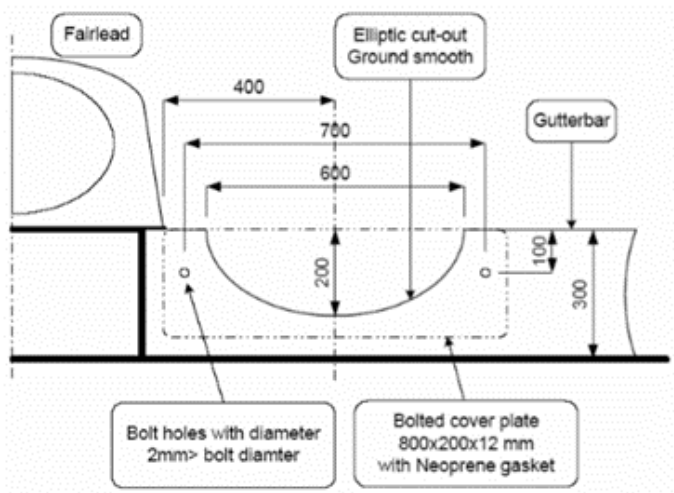


Figure 14. Design to reduce the stress in the gutter bar locally. The elliptical cut out should be ground perfectly smooth.

#### 5.4. Pipe supports

Pipe supports, manifold supports etc. frequently cause cracks in deck, also when positioned on doublers. Longitudinal stresses are combined with pillar bending in the fore and aft direction causing transverse cracks as shown on Figure 15.



Figure 15. Cracks on pipe supports on hull main deck [6].

To avoid longitudinal stresses causing the supports to bend and increase the stress around the support connection to deck, more flexible supports will improve the situation. The below

sketch shows an arrangement for anchoring a section of piping between expansion joints and leaving the other supports flexible. Figures 16 and 17 show for repairs and modification details.

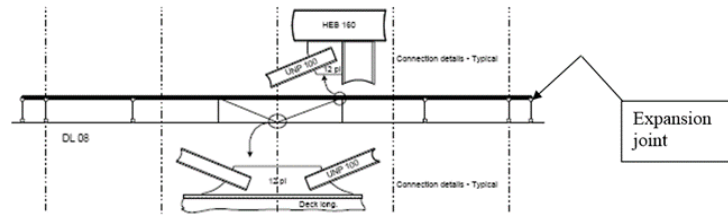


Figure 16. Recommended sketch for repair / modification on the pipe supports.

Figure 17 shows the flexible supports while Figure 18 shows the longitudinal bracings to anchor the pipe in the longitudinal direction on the main deck.



Figure 17. The flexible pipe supports.



Figure 18. The longitudinal bracings to anchor the pipe.

#### 5.5. Helicopter deck supports

Helicopter deck supports are in principle much the same as pipe supports and must be supplied with enough bracing to reduce the local bending of the supports. The remaining local bending can be

taken care of by fitting fore and aft brackets, as shown on Figure 19.



Figure 19. The applied repair / modification details on helicopter supporting structure [7].

## 5.6. Mooring and towing fittings

Under deck stiffener at front of chock foundation appears to be misaligned and aft edge not supported at all. The under deck support is completely inadequate for the loads applied. Normally all four sides of the foundation should be supported. In this case the aft edge of the chock foundation could have been welded to transom plate/gutter bar. In the cargo area, this should be avoided. Figure 20 shows panama chocks torn off poop deck by tug.

Figure 21 shows strengthening fitted under the sides of the roller. The best under deck support would be a short piece of pipe, with diameter equal to the base of the pedestal, which should be attached to surrounding stiffening [10].



Figure 20. It shows 2 off 40 t SWL panama chocks torn off poop deck by tug.

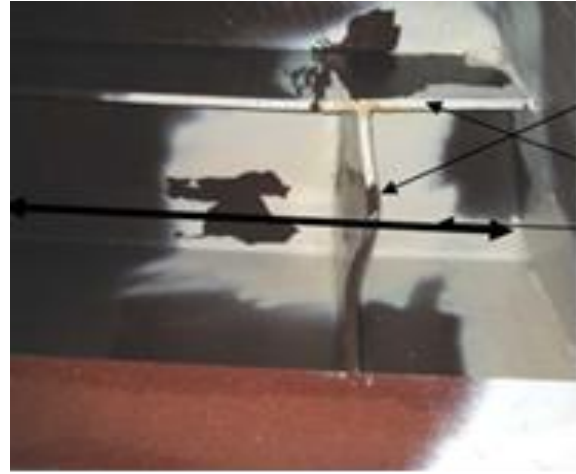


Figure 21. Recommended sketch for underdeck strengthening.

## 6. CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS

This paper aims to identify the influential parameters and provides guidelines on improvement of structural connections. It also provides reference illustrations of local structural failures experienced in some existing tankers and the corrective measures as compiled by the Tanker Structure Cooperative Forum and from Det Norske Veritas (DNV) and American Bureau of Shipping's (ABS) feedbacks in operation phase.

Following concluding remarks may be drawn for better design and repair / modification details, which can be used for ship-shaped floating ship and offshore structures. It should be noted that all those recommended repair details have been justified by both analytical and numerical analyses.

### *Stanchions or supports:*

- Consider reducing or eliminating pipe sections (internal corrosion).
- Use open type rolled / fabricated sections such as T, L, I, X, H, etc.
- Align with underdeck structure (largest member is preferable)
- Provide backup to flange.
- Use doublers only when appropriate, when under compression only.
- Use collar plates on stiffener cut-outs directly beneath supports.

### *Through fittings (pipes, radar stands, etc):*

- Where possible pass fitting through deck with sleeves
- Ensure sleeve pipe is either seamless or if welded pipe the external weld reinforcement is ground flush.
- Use ring support for larger pipe (e.g. 200+ mm diameter)
- Tie ring support into underdeck framing system.

#### **Deck openings (e.g. coamings):**

- Ensure the plate edges of the deck opening are machine cut and smooth i.e. no notches.
- Welding of fittings and coamings to the deck to be well clear of opening edges.
- Manholes, access openings, etc shall be avoided around concentrated loads and high stress regions.
- Bracket toe heights to be within 10-15mm. The purpose of the bracket “nose” is only to facilitate the effective wrap weld.
- Use soft toe terminations.
- When outfitting dimension is large and its stiffness is high, consider splitting the item.
- Check hull girder loads when working with structures longer than 3 frame spaces.
- For tall structures (e.g. radar mast) consider vibration loads.
- Lack of access (for maintenance purposes) is to be avoided.

#### **Underdeck backing:**

- Transitions to extend to stiffener/frame break. Partial transitions are to be avoided.
- Use conservative load calculations (including global and local stresses) and assume no support from the deck plate.
- Use deck inserts where shear loads are high.

#### **Gutter bars:**

- Continuous gutter bars should be treated like a sheer strake.

- Avoid connections to the upper edge of ship side gutter bars.

#### **Installations of brackets and collar plates:**

To prevent local distortions and to minimize the magnifying effects of structural notches, consideration is to be given to additional brackets and collar plates (or lugs) at the critical joints and cut-outs respectively. Alternatively, different stiffening systems may be considered to minimize the critical spots in highly stressed regions. For example, utilization of the horizontal stiffeners with appropriate tripping brackets for floors in double bottom, instead of vertical stiffeners would eliminate the critical spots at the face bar toes on the flange of longitudinal.

#### **Softening hard spots:**

To minimize the stress concentration at hard spots, such as bracket toes, tapered face plate, and welded connections of the face plate of transverses and bulkhead plating, the welded joints may be softened by providing a large radius at bracket toes or a cope hole with proper reinforcement of surrounding panel to prevent local instability.



At critical structural joints, the fatigue strength can be improved by reducing the magnitudes of nominal stresses and/or minimizing stress concentrations. In addition, it may also be advisable to consider the following improvements on the fatigue strength:

- Utilizing better contour shapes for cut-outs, such as the cope holes,
- Having bracket toe and the surrounding weld deposit ground smooth with an appropriate radius

### **REFERENCES**

- [1] American Bureau of Shipping (ABS), “Guide on Improvement for Structural Connections and Sample Structural Details – Service Experience and Modifications for Tankers”, July 1995.
- [2] Tanker Structure Co-operative Forum, “Outfitting related Structural Defects, Revision No: 0”, March 2011.

- [3] CSR, Double Hull Oil Tankers Section 11 / 3, “Support structure and structural Appendages”, 2014.
- [4] Det Norske Veritas (DNV), “Hull Ships in Operation”, Technical Information Newsletter No.5, May 2008.
- [5] Det Norske Veritas (DNV) Rules for Classification of Ships, Pt. 3 Ch. 1, “Hull structural design, Ships with length above 100 meters”, July 2014.
- [6] Det Norske Veritas (DNV) Classification Note 30.7, “Fatigue Assessment of Ship Structures”, September 2012.
- [7] Det Norske Veritas (DNV) Nauticus Hull, Nauticus Hull User Manual, “Fatigue Assessment Simplified Method”, January 2013.
- [8] O. Ozguc, “Simplified fatigue analysis of structural details of an ageing LPG carrier”, *Journal of Marine Engineering and Technology*, DOI: 10.1080/20464177.2017.1282075, 2017.
- [9] O. Ozguc, “Fatigue assessment of longitudinal stiffener end connections for ageing tankers”, *Journal of Offshore Structures and Technology*, Vol. 3(1), 1–12p, 2016.
- [10] S.R. Cho, H.S. Kim, H.M. Doh, and Y.K. Chon, “Ultimate strength formulation for stiffened plates subjected to combined axial compression, transverse compression, shear force and lateral pressure loadings”, *Ships and Offshore Structures*, Vol.8, 2013.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 07-02-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 01-08-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.290521	

## Tarihi Safranbolu’yu çevreleyen kaya şevlerindeki duraysızlık problemlerinin kinematik analizlerle değerlendirilmesi

İnan Keskin \*

### ÖZ

Şev kaynaklı afete uğrama olasılığı oldukça yüksek olan Safranbolu, ülkemiz için oldukça önemli bir yerleşim yeri olup, sahip olduğu tarihsel ve kültürel varlıklarla dünya mirası için de değerli bir kenttir. Bu dünya mirası kentteki zenginliklerin olası bir doğal afetten etkilenme potansiyellerinin ortaya çıkarılması oldukça önemlidir. Tarihi Safranbolu çok dik kaya şevleri ile çevrili olup, zaman zaman bu şevleri oluşturan kaya kütlelerinde duraysızlıklar meydana gelmektedir. Çeşitli sebep ve şekillerde serbestleşen kaya blokları, oldukça dik olan bu şevlerde kaya düşmelerine de kaynak oluşturup şev aşağı hareket ederek tarihi kente yaşam alanlarına zarar verebilmektedir. Söz konusu zararların aza indirilmesi ve tehlike potansiyelinin ortaya konulması amacıyla bu çalışmada kaya şevleri kinematik analizlerle değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında kaya düşmelerine kaynak oluşturan kaya kütlelerinin özellikleri incelenmiş elde edilen veriler ve şevlerin özellikleri dikkate alınarak kinematik kontrollü duraysızlık türleri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** UNESCO Dünya miras kenti, Safranbolu, Kaya şevi stabilitesi, Kinematik analiz

## Evaluation of the instability problems in rock slopes surrounding historical Safranbolu by kinematic analysis

### ABSTRACT

Safranbolu which has high probability for slope-induced disasters is a very worthwhile settlement for our country and also for the world with its historical and cultural heritage. Finding out potential hazards that may affect the wealth of this world heritage city is very crucial. The historic Safranbolu is surrounded by very steep rock slopes, and occasionally instability occurs in the rock mass that forms these slopes. The rock blocks that are released in various causes and shapes can damage the historic town living spaces by creating a source for the rock fallings and moving down the slope in these very steep slopes. The rock slopes were evaluated by kinematic analysis in order to reduce the mentioned damages and to reveal potential hazards. In the study, characteristics of mass that causes rock fallings are analysed, kinematic controlled instability types are determined considering the obtained data and characteristic of slopes.

**Keywords:** UNESCO world heritage, Safranbolu, Rock slope stability, Kinematic analysis



## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemiz, sahip olduğu jeolojik, topoğrafik ve meteorolojik koşullar nedeniyle büyük can ve mal kayıplarına yol açan doğal afet olayları ile sıkça karşılaşmaktadır. Türkiye, coğrafyasının yaklaşık %93'ü, nüfusunun yaklaşık %98'i deprem tehlikesiyle karşı karşıya olduğu bir ülkedir. Ancak ülkemizdeki kentsel ve kırsal yerleşim alanları, sadece depremle değil aynı zamanda da heyelan, su baskını, kaya düşmesi vb. tehlikelerin yarattığı zararlarla mücadele etmek zorunda kalmaktadır. Geçmişte meydana gelen bu tür afetler nedeniyle birçok vatandaşımız hayatını kaybetmiş veya yaralanmış ve sonucunda da yüksek miktarda ekonomik kayıplar yaşanmıştır. Afet İşleri Genel Müdürlüğünün hazırlamış olduğu "Türkiye'de Afetlerin Mekânsal ve İstatistiksel Dağılımı Afet Bilgileri Envanteri"ne göre 1950-2008 yılları arasında ülkemizdeki 35471 yerleşim biriminin %44'ü en az bir kez afete maruz kalmıştır [1]. Bu afetlerin %55'nin kaynağını depremler, geri kalan kısmını da heyelan, kaya düşmesi, yangın gibi doğal afetler oluşturmaktadır. Bu türden bir afete uğrama olasılığı oldukça yüksek olan Safranbolu, ülkemiz için oldukça önemli bir yerleşim yeri olup, sahip olduğu tarihsel ve kültürel varlıklarla dünya mirası için de değerli bir kenttir. Sahip olduğu zengin kültürel miras ve bu mirası korumadaki başarısı Safranbolu'yu bir dünya kenti ününe kavuşturmuş ve UNESCO tarafından Dünya Miras Listesi'ne alınmasını sağlamıştır. Safranbolu tarihi kenti aynı zamanda ülkemizdeki UNESCO tarafından koruma altına alınan dokuz yerleşkeden birisidir. 1300'ü koruma altında olan sayısız kültürel eseri bulunan Safranbolu, bugün kent ölçeğinde en iyi korunan yer olarak anılmaktadır (Şekil 1). Dünya tarihi mirasının korunması ve yasatılması açısından, dünya insanına bu mekanları doğal halleriyle görsel olarak modellemek önemli bir kültür ve turizm hizmetidir. Bu nedenlerle, bu dünya mirası kentteki zenginliklerin olası bir doğal afetten etkilenme potansiyellerinin ortaya çıkarılması oldukça önemlidir.

Bu bakış açısından yola çıkılarak planlanan bu çalışma ile Safranbolu çevresindeki kaya düşmelerinin yaşandığı tarihi Safranbolu çevresindeki kaya şevlerin duraylılığı kinematik yöntemlerle incelenmiştir. Çalışma alanında birçok kaya düşmesi gözlenmiş olmakla birlikte kaya düşmesine potansiyel oluşturan duraysız

birçok alan da mevcuttur. Bu kaya düşmelerinin ve potansiyel kaya bloklarının yoğun olduğu yönler ise genelde yerleşim alanlarını tehdit eder konumdadırlar. Bölge geçmişte birçok kaya düşmesi etkisinde kalmış ve yerleşim alanlarında birçok ev hasara uğramıştır. Bu nedenle kaya düşmelerine kaynak oluşturan söz konusu şevlerin kinematik açıdan değerlendirilmesi ve kaynak bölgelerin saptanması oldukça önemlidir. Çalışma alanı olan Safranbolu ilçesi tarihi yerleşim yeri 14° 15' 03"- 41° 14' 54" kuzey enlemleri ve 32° 41' 15"- 32° 41' 29" doğu boylamları arasında, Karabük ilinin KB'sında yer almaktadır (Şekil 2).

## 2. ÇALIŞMA ALANININ JEOLÖJİK VE JEOMORFOLOJİK ÖZELLİKLERİ (GEOLOGICAL AND GEOMORPHOLOGICAL FEATURES OF STUDY AREA)

Çalışma alanı Türkiye tektonik birliklerinden Pontidler [2] üzerinde ve Karabük-Safranbolu Tersiyer Havzası'nın kuzey kenarında yer alır. Tektonik olarak da aktif bir fay olan Kuzey Anadolu Fay Zon'una çok yakındır (Şekil 3). Bu nedenle bölgedeki kayaçlar genelde kırıklı, ezilmiş ve süreksizlikler içermektedir. Çalışmaya konu olan bölge ve yakın çevresinde, yaşlıdan gence doğru Şekil 4'de ifade edildiği üzere; Üst Paleosen-Alt Eosen yaşlı Kışlaköy formasyonu, Alt-Orta Eosen yaşlı Safranbolu formasyonu, Alt-Orta Eosen yaşlı Karabük formasyonu, Orta Eosen yaşlı Soğanlı formasyonu, Orta Eosen Yaşlı Akçapınar formasyonu, Orta-Üst Eosen yaşlı Yunuslar formasyonu, Pliyosen yaşlı Örencik formasyonu ve Alüvyon (Qal) bulunmaktadır [3].

Çalışma alanının bazı jeomorfolojik özellikleri Millî Savunma Bakanlığı Harita Genel Komutanlığı tarafından temin edilen çözünürlüğü 45 cm olan ortofoto görüntüleri (Şekil 5) kullanılarak ArcGIS 10.2 programı aracılığı ile ortaya konulmaya çalışılmıştır. Buna göre, inceleme alanında en düşük yükseklik değeri 360 m, ortalama yükseklik değeri 481 m ve en fazla topoğrafik yükseklik değeri ise 580 m'dir (Şekil 6). Sayısal yükseklik modeli kullanılarak çalışma alanının eğim haritası üretilmiş olup eğim değerleri 14 eşit sınıfa ayrılarak yorumlanmıştır. Buna göre sahadaki eğimler 0-85° aralığında değişmektedir (Şekil 7). Farklı yönlerde bakan yamaçların güneş, donma-çözülme, yağış ve maruz kaldığı güneş ışığı gibi

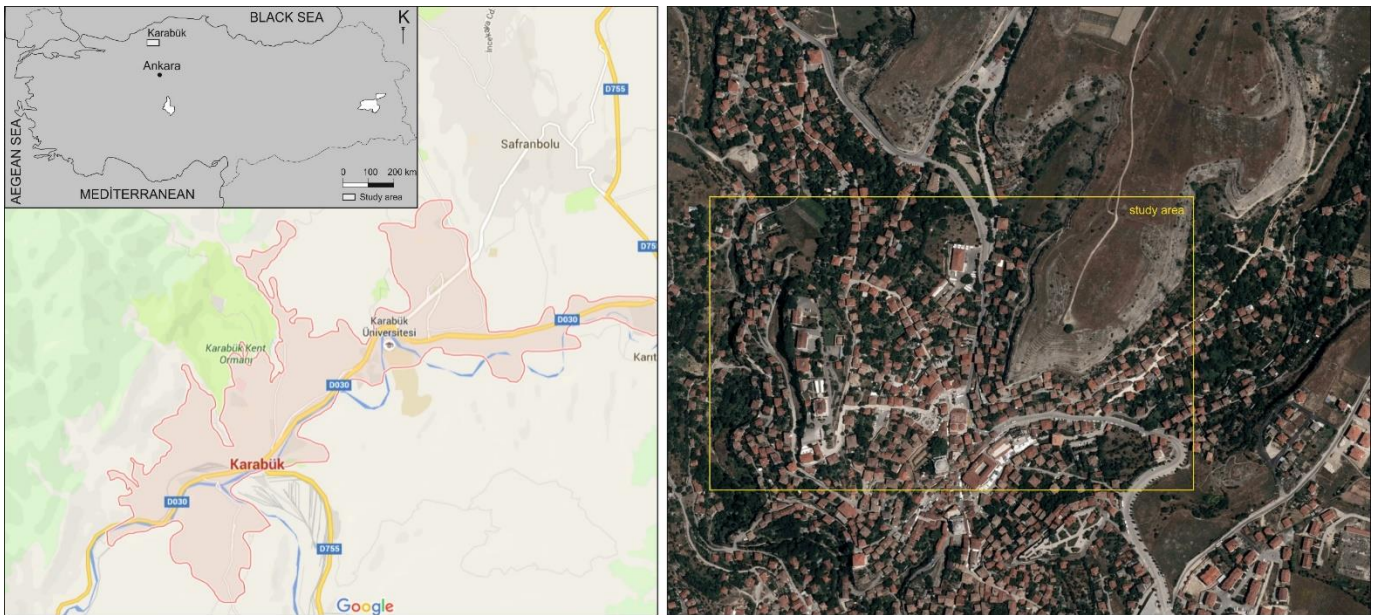
atmosferik ve iklim olaylarından etkilenme dereceleri de farklı olmaktadır. Bu nedenden dolayı yamaç yönelimi (bakı), kaya şevlerinde meydana gelen duraysızlıkların nedenlerinin değerlendirilmesinde dikkate alınan önemli morfolojik parametrelerden birisini oluşturur. Bölgede potansiyel alanların farklı boyuttaki serbest kaya bloklarının ilerleme yönünün

değerlendirilmesi amacıyla yamaç yönelimi haritası oluşturulmuştur (Şekil 8).

Bu haritada çalışma alanındaki yamaç yönelimi değerleri 10 sınıfa ayrılmıştır. Çalışma alanında, güney ve güneybatı yönleri en çok görülen yamaç yönelimi değerlerini oluşturmaktadır.



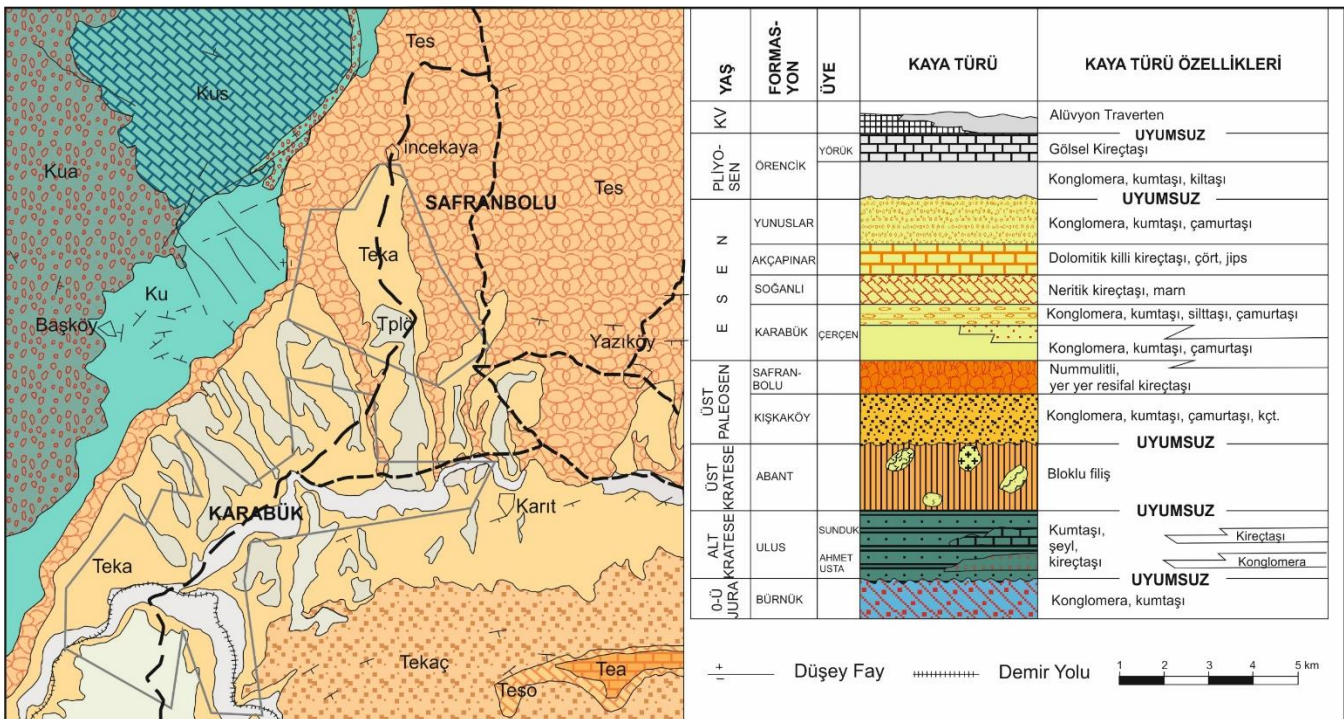
Şekil 1. UNESCO tarih kenti Safranbolu'dan görüntü (An image from Safranbolu UNESCO heritage city)



Şekil 2. Çalışma alanının yerbulduru haritası (Location map of study area)



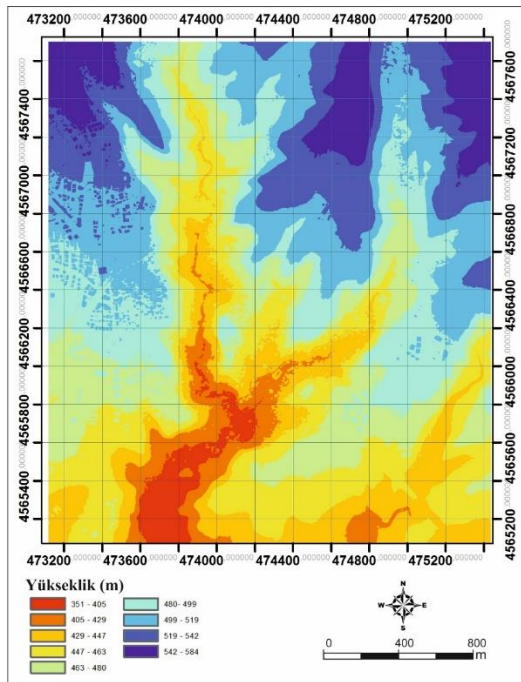
Şekil 3. Çalışma alanı ve yakın çevresinin Türkiye'nin ana faylarına göre konumu (The location of the study area and its proximity to Turkey's main fault zones)



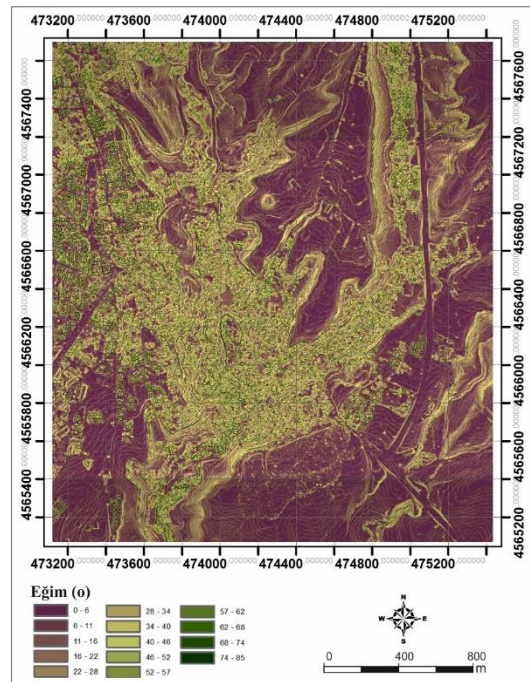
Şekil 4. Çalışma alanı ile çevresinin jeoloji haritası ve dikme kesiti [3] (Geology map and stratigraphic section of the study area [3])



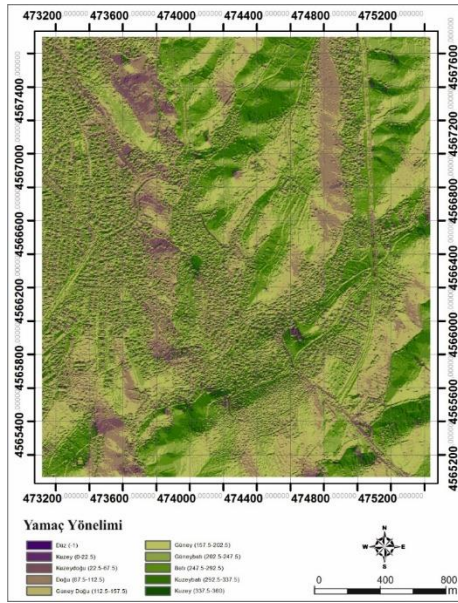
Şekil 5. İnceleme alanını içeren orto foto görüntü (Ortho-photo image covering the review area)



Şekil 6. İnceleme alanının dijital yükseklik modeli (Elevation maps of the study area)



Şekil 7. İnceleme alanının eğim haritası (Slope map of the study area)



Şekil 8. İnceleme alanının yamaç yönelim haritası (Aspect map of the study area)

### 3. ARAZİ ÇALIŞMALARI VE SÜREKSİZLİK ANALİZLERİ (FIELD INVESTIGATION AND DISCONTINUITY ANALYSIS)

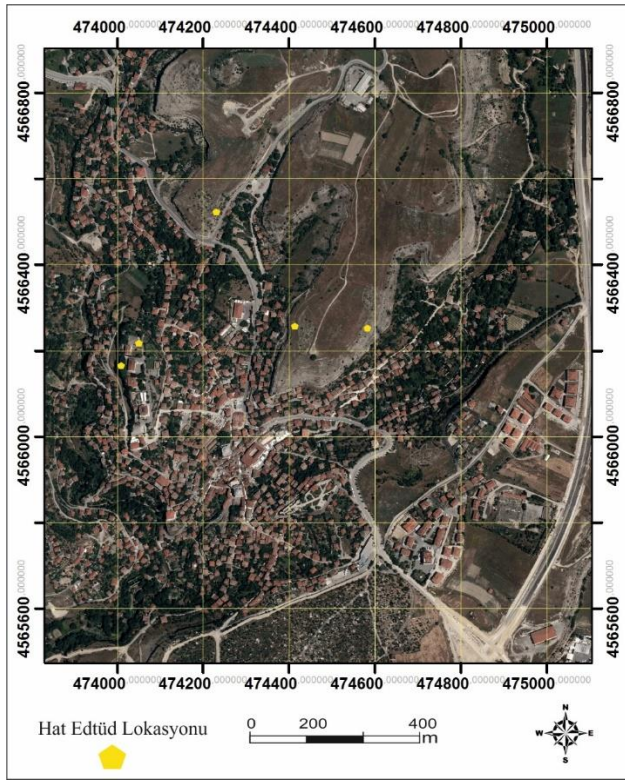
Çalışma kapsamında Safranbolu ilçesinde tarihi Safranbolu yerleşim yerini adeta sınırlayan kaya şevleri arazi çalışmalarıyla detaylıca incelenmiştir. Bu çalışmalarda arazi gözlemleri sonucunda belirlenen olası kaya düşme tehlike alanları haritalanmış, kaya düşmelerine kaynak oluşturmasından dolayı Safranbolu formasyonuna ait kireçtaşlarında süreksizlik ölçümleri alınmıştır.

Süreksizlikler kaya kütlelerinin duraylılığını etkileyen en önemli parametredir. Süreksizliklerin mühendislik özellikleriyle ilgili veri toplanmasında pencere haritası ve hat etütü olmak üzere iki yöntem yaygın olarak kullanılmaktadır. Pahl [4] tarafından hat etütü yöntemine alternatif olarak önerilen pencere haritası, kaya kütlesi yüzleğinde belirlenen bir alan içerisinde kalan süreksizliklerin özelliklerin tayin edilmesi esasına dayanmaktadır. Geniş bir alanda kaya kütlelerinin incelenmesine ve süreksizliklerden doğrudan ölçüm alınmasına olanak sağlayan hat etütü yöntemi daha fazla tercih edilmektedir. Jennings [5] tarafından önerilen yöntem, daha sonra Piteau [6] tarafından revize edilmiş, Fookes ve Denness [7], Attewell ve Farmer [8], Priest ve Hudson [9] gibi araştırmacılar ile ISRM 1978 [10] tarafından geliştirilmiştir ve sonraki yıllarda ISRM (2007) [11] tarafından yapılan önerilerle bugünkü

halini almıştır [12]. Pencere haritalaması yönteminin oldukça engebeli ve keskin şevlerle sınırlanan böyle bir sahada etkin bir biçimde uygulanmasının oldukça güç olacağı dikkate alınarak, süreksizliklere ait özellikler hat etütü çalışmaları ile belirlenmiştir. Ancak çalışma alanındaki litoloji, sahanın tamamında oldukça benzer bir özellik sunmasına rağmen konglomeratik bir yapıda olması ölçümlerin yapılmasında zorluklara neden olmuştur. İnceleme alanındaki kireçtaşlarının yüzlek verdiği ve kaya düşme tehlikesinin bulunduğu kesimler sarp bir topoğrafya ve dik falezler sunmaktadır (Şekil 9). Bu nedenle, hat etütü yapılabilecek sınırlı sayıda yüzlek bulunmakta olup, Şekil 10'da gösterilen 5 yerde hat etütü çalışmaları ISRM (2007) tarafından önerilen yöntemine uygun olarak yapılmaya çalışılmıştır [11]. Özellikle sınırlı sayıda yüzlekte ölçüm ve gözlem yapılabilmesi nedeniyle, örnekleme açısından ISRM 2007 [11] tarafından önerilen sayılara ulaşamamıştır. Hat etütüleri, her yerde şev aynasının doğrultusuna paralel olarak yapılmış ve süreksizliklerin türü, konumu, açıklığı, devamlılığı, dolgu malzemesinin türü, bozunmanın derecesi, yüzey pürüzlülüğü ve su durumu ile ilgili bilgiler süreksizlik veri formlarına işlenmiştir. İnceleme alanında toplam 43 m hat etütü gerçekleştirilmiştir.

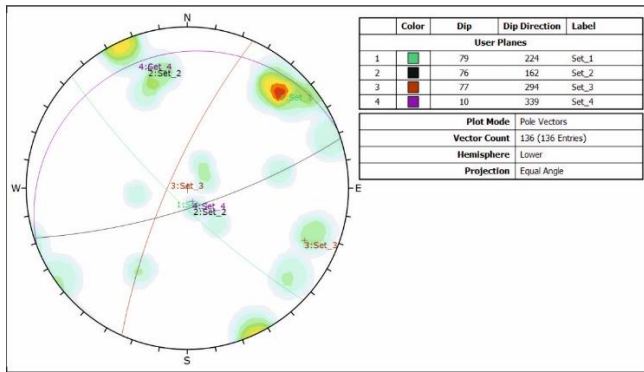


Şekil 9. Süreksizlik analizlerinin yapıldığı lokasyonlardan görüntüler (Images from discontinuity analysis locations)



Şekil 10. Hat etütlerinin gerçekleştirildiği lokasyonlar (Location of scan line in study area)

İnceleme alanında eklemli kireçtaşlarında 136 adet süreksizliğe ait eğim ve eğim yönü ölçümleri alınmıştır. DIPS 6.0 programı [13] kullanılarak süreksizlik yönelimlerinin dağılımını gösteren kontur diyagramı çizilmiştir (Şekil 11). Yapılan analizler sonucunda dört ana süreksizlik seti ve bu süreksizlik setlerinin yanı sıra, rastgele gelişmiş süreksizliklerin varlığı da belirlenmiştir. Dört ana süreksizlik setinin yönelimleri; Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239 şeklindedir. Set 4 tabakalanmaya, Set 1, Set 2 ve Set 3 ise eklemlere aittir.



Şekil 11. Süreksizlik analiz verileri (Analysis of discontinuity in the study area.)

İnceleme alanında, kaya yüzleklerinin yüzeyi döküntülerden temizlenerek, belirlenen etüt hattını kesen tüm süreksizliklerin açıklıkları kumpas ve cetvel kullanılarak ölçülmüştür. İnceleme alanında yerleri Şekil 10'da gösterilen 5 ayrı yerde yapılan hat etütlerinden elde edilen ölçümler istatistiksel olarak değerlendirildiğinde, ortalama açıklık 12.4 mm, en küçük açıklık değeri 0,8 mm, en büyük açıklık değeri ise 55 mm olarak elde edilmiştir. Lokasyonlardaki süreksizlikler genellikle dolgu içermemekte, ancak yer yer kil ve kalsit dolgu gözlenmektedir. ISRM (2007) [11], süreksizlik açıklıklarını tanımsal olarak Tablo 1'de verildiği şekliyle sınıflandırmıştır. Buna göre; süreksizlikler "boşluklu"dan "açık" yapılara kadar değişen bir sınıf aralığına sahip olmakla birlikte, genelde "açık" olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Açıklık tanımlama ölçütleri [11] (discontinuity definition criteria [11])

Açıklık (mm)	Tanımlama	
<0.1 mm	Çok sıkı	
0.1 – 0.25 mm	Sıkı	"Kapalı" yapılar
0.25 – 0.5 mm	Kısmen açık	
0.5 – 2.5 mm	Açık	
2.5 – 10 mm	Orta derecede geniş	"Boşluklu" yapılar
>10 mm	Geniş	
1 – 10 mm	Çok geniş	
10 – 100 mm	Aşırı geniş	"Açık" yapılar
>100 mm	Boşluklu	

Çalışma alanının tamamı için süreksizlik aralık ölçümleri istatistiksel olarak değerlendirildiğinde, süreksizlik aralıklarının %50'den fazlası 60-200 mm arasında değişmekte olup, çalışma alanında 20-60 mm, 200-600 mm ve 600-2000 mm aralıklı süreksizlikler de mevcuttur. İnceleme alanındaki süreksizlik aralığı değerleri ISRM (2007) [10] tarafından önerilmiş süreksizlik aralığı tanımlama ölçütleri esas alınarak değerlendirildiğinde, eklem aralıkları "dar aralıklı"dan "geniş aralıklı"ya kadar değişmekte olup çoğunluğu "yakın aralıklı" olarak tanımlanmıştır (Tablo 2).

Kaya kütlesi özelliklerinin ölçümü sırasında, süreksizliklerin boyu ve alansal uzunluğu ile belirtilen devamlılıkları da şerit metre yardımıyla ölçülmüş ve değerlendirilmiştir. Çalışma alanındaki kaya kütlesi genelde oldukça kalın bir tabakalanma özelliği sunmakta ve çalışma alanının

tamamında tabakalanmalar oldukça devamlı bir özellik göstermektedir. Bu anlamda devamlılık parametresini değişken kılan eklem devamlılığıdır. İnceleme alanını oluşturan birim konglomeratik kireçtaşı olduğu için eklem devamlılığı oldukça düşük olmaktadır. Çalışma alanındaki birimlerde ölçülen eklemlerin devamlılıklarının tanımlanmasında ISRM. (2007) [11] tarafından önerilen devamlılık tanımlama ölçütleri (Tablo 3) kullanılmış olup, kaya kütlelerindeki süreksizlikler “çok düşük-düşük derecede devamlı” olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Süreksizlik aralık tanımlama ölçütleri [11] (Discontinuity spacing definition criteria [11])

Aralık (mm)	Tanımlama
<20	Çok dar aralıklı
20-60	Dar aralıklı
60-200	Yakın aralıklı
200-600	Orta derecede aralıklı
600-2000	Geniş aralıklı
2000-6000	Çok geniş aralıklı
>6000	İleri derecede geniş aralıklı

Tablo 3. Devamlılık tanımlama ölçütleri [11] (Discontinuity persistence definition criteria [11])

Tanımlama	Devamlılık
Çok düşük devamlılık	<1 m
Düşük derecede devamlılık	1-3
Orta devamlılık	3-10 m
Yüksek devamlılık	10-20 m
Çok Yüksek devamlılık	>20 m

#### 4. KINEMATİK ANALİZLER (FIELD INVESTIGATION AND DISCONTINUITY ANALYSIS)

Kinematik analizler, duraylılığın süreksizlik sistemleri tarafından kontrol edildiği kaya

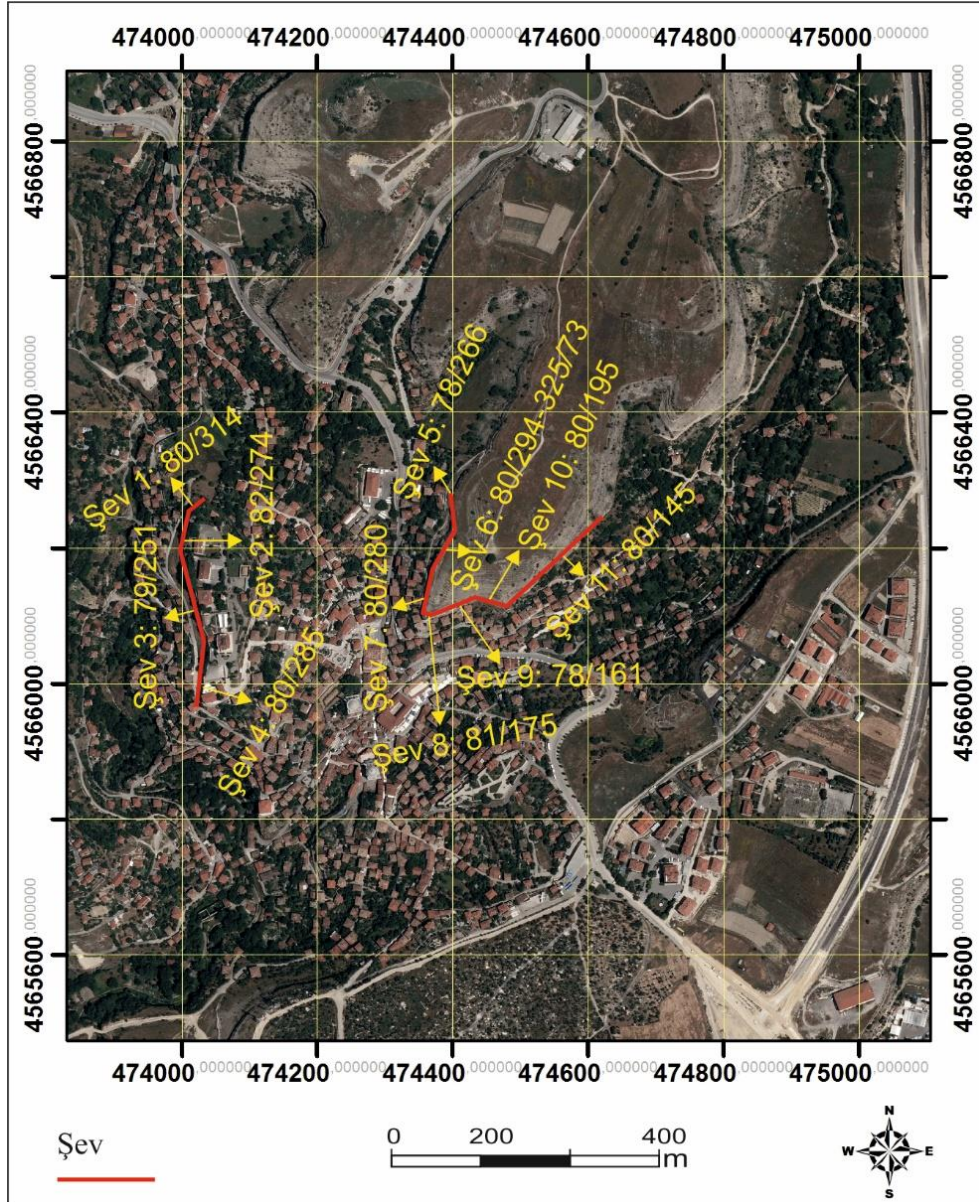
kütlelerinde duraysızlık problemleri yaşanabilecek olası şevlerin ayırt edilmesi amacıyla ayrıntılı analizlere başlamadan önce kullanılan bir yöntemdir [12]. Bu yöntem, birçok araştırmacı [14-23] tarafından en fazla tercih edilen yöntem olmasına ve birçok avantaj sunmasına karşın, bazı sınırlamalara da sahiptir. Sadece ön tasarım için uygun olması, kritik süreksizliklerin kesin olarak belirlenmesinin gerekliliği, yenilme yüzeyine ait kohezyonun, dış yüklerin, boşluk suyu basıncının, kayan kütlelerin ağırlığının ve dinamik yüklerin dikkate alınmaması bu yöntemin en önemli sınırlamalarıdır. İlk olarak Hoek ve Bray [24] tarafından tanımlanan, Goodman [25] tarafından geliştirilen ve Wyllie ve Mah [26] tarafından yeniden düzenlenen kinematik analiz yönteminde, sadece süreksizlik yönelimleri, şev yönelimi ve süreksizlik yüzeylerinin içsel sürtünme açıları dikkate alınarak, düzlemsel kayma, kama kayması ve devrilme türü yenilmeler için duraylılık analizleri yapılmaktadır. Bu yöntemde analizler, süreksizlik setlerinin ve incelenen şevin durumlarının süreksizliklerin içsel sürtünmesi de dikkate alınarak steronetler kullanılarak elle ya da bu amaçla yazılmış yazılımlarla gerçekleştirilmektedir.

Süreksizlikler ve yamacın konumları arasındaki ilişkiler bu analizlerin girdi parametreleridir. Bu yöntemde; düzlemsel, kama ve devrilme türü duraysızlıklar incelenir ve şev ile duraysızlığa neden olabilecek süreksizliklerin yönelimi ve süreksizlik yüzeyinin içsel sürtünme açısı ( $\Phi$ ) analizlerde girdi parametre olarak kullanılır. Bu çalışmada süreksizliklerin içsel sürtünme açısı Barton [27] tarafından önerilen yenilme ölçütü kullanılarak 350 olarak kabul edilerek kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. İnceleme alanında olası kinematik kontrollü yenilmeleri ortaya koyabilmek amacıyla eski Safranbolu'yu çevreleyen şevler, yönelimleri baz alınarak Şekil 12'de belirttiği üzere 11 sınıfa ayrılmış ve her bir şev için DIPS 6.0 programı kullanılarak ayrı ayrı kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Egemen eklem durumları dikkate alınarak yapılan bu analizlerdeki girdi parametreleri Tablo 4'de her bir hat için ayrı ayrı verilmiştir.

İnceleme alanının batısında Safranbolu hükümet konağı ve Jandarma binalarının bulunduğu tepenin batıya bakan yamacındaki Şev 1, 2, 3, 4 olarak adlandırılan Safranbolu formasyonu'dan oluşan

şevlerde, dört hakim süreksizlik sistemi baz alınarak DIPS 6.0 programı (Rocscience 2012) ile yapılan analizlere göre; herhangi bir devrilme türü duraysızlık gözlenmezken, Şev 1, 2, 3, 4' de kama kayması, ve Şev 1, 2, 4'de düzlemsel kayma tipte duraysızlıkların oluşma potansiyeli olduğu analiz edilmiştir. Şev 1'de düzlemsel kayma 76/162 konumlu süreksizlik tarafından denetlenirken 79/224 ile 77/294 yönelimine sahip süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesit yönünde kama kayması tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 13). Şev 2'de düzlemsel kayma 77/294 konumlu süreksizlik tarafından denetlenirken, 79/224 ile 77/294 yönelimine sahip süreksizlikler ve 76/162 ile 77/294 yönelimli süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesitler yönünde kama tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil

13). Şev 3'de düzlemsel kayma ve devrilme türü duraysızlık olasılığı gözlenmezken, 79/224 ile 77/294 yönelimine sahip süreksizlikler ve 76/162 ile 77/294 yönelimli süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesitler yönünde kama kayması tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 13). Şev 4'de yapılan kinematik analizlerde devrilme türü duraysızlık olasılığı gözlenmezken, 77/294 süreksizliği ile denetlenen düzlemsel kayma olasılığı tespit edilmiştir. Yine aynı şevde 79/224 ile 77/294 yönelimine sahip süreksizlikler, 76/162 ile 77/294 süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesitler yönünde kama kayması tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 13).



Şekil 12. Kinematik analizlerin gerçekleştirildiği şevler ve durumları (Locations kinematic analysis in study area)



Tablo 4. Kinematik analizlerde göz önünde bulundurulmuş şev parametreleri (Slope parameters taken into account in kinematic analyses)

Şev No	Şev Yönelimi (Eğim/Eğim Yönü)	Hakim Eklem Yönelimi	Süreksizlik Düzlemlerinin İçsel Sürtünme Açısı ( $\Phi$ )	Litoloji
Şev 1	80/314	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 2	82/274	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 3	79/251	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 4	80/285	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 5	78/266	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 6	80/294--73/325	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239 Set 5: 65/335	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 7	80/280	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 8	81/175	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 9	78/161	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 10	80/195	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı
Şev 11	80/145	Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239	35°	Yumrulu Kireçtaşı

Eski Safranbolu'nun Kuzey bölümündeki yamaçların duraysızlığı ise Şev 5, Şev 6, Şev 7, Şev 8, Şev 9 ve Şev 10 olarak adlandırılan 6 şev profili baz alınarak kinematik yöntemle araştırılmıştır. Bu şevleri oluşturan kaya kütlesi de Safranbolu Formasyonu'na ait yumrulu kireçtaşlarıdır. Şevlerde dört hakim süreksizlik sistemi baz alınarak, DIPS 6.0 programı (Rocscience 2012) ile yapılan kinematik analizlere göre; Şev 6'da devrilme türü duraysızlık, Şev 5, 6, 7, 8, 9 ve Şev 10'da kama kayması, ve Şev 6b, Şev 7, Şev 8, Şev 9, Şev 11 'de düzlemsel kayma tipte duraysızlıkların oluşma potansiyeli olduğu analiz edilmiştir. Şev 5'de düzlemsel kayma ve devrilme potansiyeli görülmezken, 79/224 ile 77/294 yönelimine sahip süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesit yönünde kama tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 13). Şev 6 birbirine yakın yönelimle tanımlanmış ve hâkim eklem yönelimlerinin yanında tali bir eklem seti olan 65/335 eklemi de dikkate alınarak analiz edilmiştir. Buna göre 77/294 konumlu süreksizlik tarafından tanımlanan her iki şevde de düzlemsel kayma denetlenmektedir. Şev 6b ile indislenen şev üzerinde 65/335 yönelimli süreksizlik denetimli devrilme olasılığı gözlenmektedir. Şev 6a'da 65/335 ile 77/294, 79/224 ile 77/294, 76/162 ile

79/294, 65/335 ile 79/224 yönelimine sahip süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesitler yönünde, Şev 6b'de ise 65/335 ile 77/294 ve 65/335 ile 79/224 yönelimine sahip süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesitler yönünde kama kayması tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 13). Şev 7'de 77/294 yönelimli süreksizlik denetimli düzlemsel kayma ve 79/224 ile 77/294 ve 77/294 ile 76/162 yönelimli süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesitler yönünde kama tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 13). Şev 8'de yapılan kinematik analizlerde devrilme türü duraysızlık olasılığı gözlenmezken, 76/162 süreksizliği ile denetlenen düzlemsel kayma olasılığı tespit edilmiştir. Yine aynı şevde 79/224 ile 76/162 ve 77/294 süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesitler yönünde kama tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 13). Şev 9'de 77/294 yönelimli süreksizlik denetimli düzlemsel kayma ve 79/224 ile 77/294 ve 77/294 ile 76/162 yönelimli süreksizliklerin kesişmesi sonucu oluşan arakesitler yönünde kama kayması tipi yenilme oluşma potansiyeli bulunmaktadır (Şekil 13). Şev 10'da yapılan kinematik analiz sonuçları incelendiğinde bu şevde sadece kama kayması türü duraysızlık potansiyelinin bulunduğu görülmüştür. Şekil

13'de verilen analiz sonuçları incelendiğinde 76/162 durumlu süreksizliğin 77/294 ve 79/224 durumlu süreksizliklerle kesişimlerinin kama türü kayma için tehlikeli alanda kaldığı görülmüştür. Şev 11'da yapılan kinematik analiz sonuçlarına göre devrilme türü duraysızlık olasılığı gözlenmezken, 76/162 süreksizliği ile denetlenen düzlemsel kayma olasılığı tespit edilmiştir. Şev kamasal kayma açısından irdelendiğinde 79/224 ile 76/162 süreksizliklerin kesimlerinin kama kayma için tehlikeli bölgede olduğu, dolayısıyla da bu şev üzerinde kamasal bir yenilme olasılığının bulunduğu görülmüştür Şekil (13).

Kinematik analizler toplu olarak değerlendirildiğinde tanımlanan şevlerin büyük bir bölümünde kinematik açıdan farklı kaya kütle duraysızlıklarını oluşturabilecek süreksizlik sistemleri bulunmakta olup analiz sonuçlarını içeren özet Tablo 5'de sunulmuştur. Kaya düşme açısından irdelenmesi gereken durum, düzlemsel, kamasal kayma ve devrilme şeklinde başlayan kaya kütle duraysızlıkları şevin genel eğimine bağlı olarak kaya düşmesi ve yuvarlanması şekline devam ederek yerleşim alanlarına tehdit edebilecek durumda oluşudur. Bu mekanizma bu nedenle kaya düşme analizlerinde önemli olmaktadır.

Tablo 5. Belirlenen şevlerde kinematik açıdan oluşabilecek duraysızlıklar (Summary of kinematic analysis results)

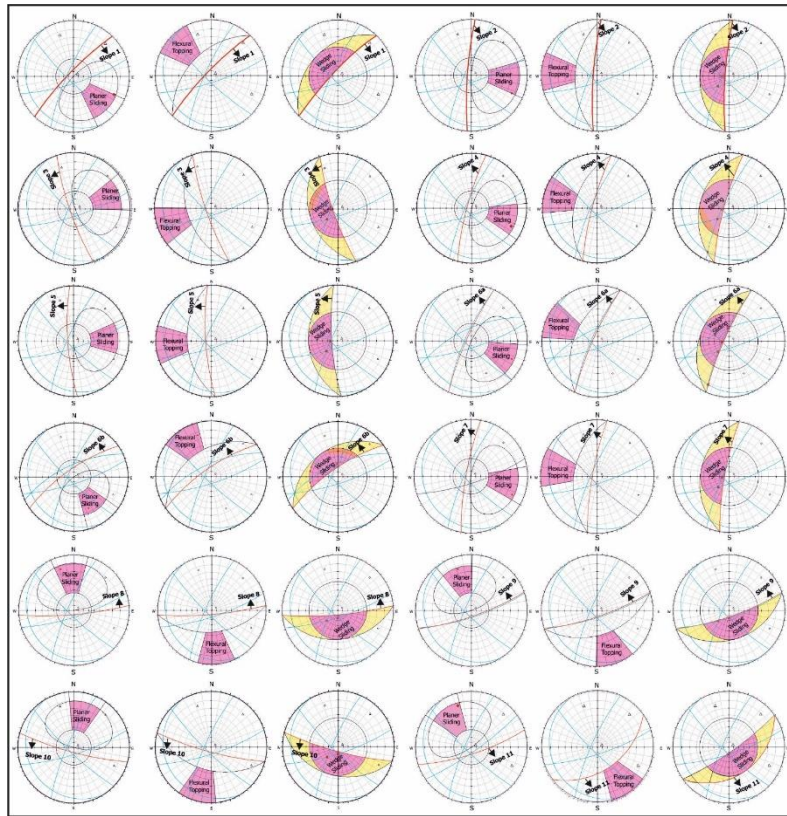
Şev	Düzlemsel kayma	Kamasal Kayma	Devrilme
Şev 1	√	√	
Şev 2	√	√	
Şev 3		√	
Şev 4	√	√	
Şev 5		√	
Şev 6a-b	√	√	√
Şev 7	√	√	
Şev 8	√	√	
Şev 9	√	√	
Şev 10		√	
Şev 11	√	√	

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND CONCLUSIONS)

Safranbolu ilçesi tarihi yerleşim yeri; kumtaşı, çamurtaşı, konglomeradan oluşan Karabük formasyonunda oluşan dik şevlerle sınırlanmıştır. Söz konusu şevlerde oldukça dik falez oluşumları söz konusu olup bu falezlerde farklı büyüklükte asılı ve süreksizliklerle sınırlı kaya blokları gözlenmektedir. İlçedeki kaya düşme tehlikesi bu formasyondan oluşan seviyelerin aşınması sonucu oluşmaktadır. Çalışma alanında meydana gelen kaya kütle duraysızlıklarında süreksizlik büyük rol oynamaktadır. Yapılan süreksizlik çalışmalarına göre, dört ana süreksizlik seti ve bu süreksizlik setlerinin yanı sıra, rastgele gelişmiş süreksizliklerin varlığı belirlenmiştir. Üç ana süreksizlik setinin yönelimleri; Set 1: 79/224, Set 2: 76/162, Set 3: 77/294, Set 4: 10/239 şeklindedir. Set 4 tabakalanmaya, Set 1, Set 2 ve Set 3 ise eklemlere aittir. İnceleme alanında bazı noktalarda eklemler şev doğrultusuna paralel olarak gelişmiştir. İnceleme alanında olası kinematik kontrollü yenilmeleri ortaya koyabilmek amacıyla eski Safranbolu'yu çevreleyen şevler, yönelimleri baz alınarak 11 sınıfa ayrılmış ve her bir şev için ayrı ayrı kinematik analizler gerçekleştirilmiştir. Eğemen eklem durumları dikkate alınarak yapılan kinematik analizlere göre tanımlanan şevlerin büyük bir bölümünde kinematik açıdan farklı kaya kütle duraysızlıklarını oluşturabilecek süreksizlik sistemleri bulunmaktadır. Kinematik açıdan kamasal kayma ve düzlemsel türü duraysızlıklar daha yoğun gözlenirken, devrilme türü duraysızlık ise sınırlı sayıda şevde izlenmiştir.

## KATKI BELİRTME (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma TÜBİTAK 114Y265 projeden üretilmiştir. Yazar finansal desteğinde dolayı TÜBİTAK'a teşekkür eder.





Şekil 13. Analiz edilen tüm şevlerdeki kinematik analiz sonuçları (Evaluations of kinematic analysis in study area)

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] O. Gökçe, Ş. Özden ve A. Demir, «Türkiye'de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı afet bilgileri envanteri,» Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü Bayındırlık ve İskan Bakanlığı Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2008.
- [2] İ. Ketin, «Tectonic units of Anatolia,» Bull. Mineral Research and Exploration Institute of Turkey, cilt 66, pp. 22-34, 1966.
- [3] E. Timur ve A. Aksaray, «1:100000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları No:30 Zonguldak F29 Paftası,» Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara, 2002.
- [4] P. Phal, «Estimating the mean length of discontinuity traces,» International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts , cilt 18, pp. 221-228, 1981.
- [5] J. Jennings, «A mathematical theory for the calculation of the stability of open cast mines,» %1 içinde Proc. Symp. On Planning Open Pit Mines, Cape Town, Balkema,, 1970.
- [6] D.R. Piteau, «Geological factors significant to the stability of slopes cut in rock,» %1 içinde Proc. of The Symp. on Planning Open Pit Mines, South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg,, 1970
- [7] P. Fookes ve B. Denness , «Observational studies on fissure patterns in Cretaceous sediments of southeast England,» Geotechnique,, cilt 19, no. 4, pp. 453-77, 1969.
- [8] P. Attewell ve I. Farmer , Principles of engineering geology, Chapman and Hall: London, 1976.
- [9] S. Priest ve J. Hudson , «Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys,» International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts,, cilt 18, no. 3, pp. 183-197, 1981 .
- [10] ISRM, «Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses,» International Rock Mechanics and Mining Science, Geomech. Abstr. , cilt 15, pp. 319-368, 1978.
- [11] ISRM, The complete isrm suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006. Suggested Methods prepared by the Commission on

- Testing Methods, ISRM, R. Ulusay and J.A. Hudson (Ed.), Ankara: Kozan Ofset, Ankara, 628s., 2007.
- [12] R. Ulusay ve H. Sönmez, Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri, Ankara: TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları: 60, 2002.
- [13] Rocscience, Dips v6.0 Graphical and statistical analysis of orientation data, Rocscience Inc., Toronto, Ontario, 2012.
- [14] C. Gokceoglu , H. Sonmez ve M. Ercanoglu , «Discontinuity controlled probabilistic slope failure risk maps of the Altındağ (settlement) region in Turkey,» Engineering Geology, cilt 55, pp. 277-296., 2000.
- [15] W. Yoon , U. Jeong ve J. Kim, «Kinematic analysis for sliding failure of multi-faced rock slopes,» Engineering Geology , cilt 67, no. 1-2 , pp. 51-61, 2002.
- [16] B. Kentli ve T. Topal, «Assesment of rock slope stability for a segment of the Ankara-Pozanti motorway Turkey,» Engineering Geology, cilt 74, no. 1-2, pp. 73-90, 2004.
- [17] İ. Keskin ve I. Yılmaz, «Şebinkarahisar ve çevresindeki kütle hareketleri ve kaya şevlerinin duraylılığının kinematik değerlendirilmesi,» Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi Seri A-Yerbilimleri , cilt 23, no. 1-2, pp. 25-42., 2006.
- [18] G. Özdemir , İ. Keskin ve I. Yılmaz, «Aluçra (Giresun) yöresindeki kaya şevlerinin duraylılığının kinematik analizi ve yapısal yaklaşım,» Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Seri A-Yerbilimleri, cilt 24, no. 1-2, pp. 1-18, 2007.
- [19] Z. Gurocak , S. Alemdag ve M. Zaman, «Rock slope stability and excavatability assessment of rocks at the Kapıkaya Dam site, Eastern Turkey,» Engineering Geology, cilt 96, no. 1-2, pp. 17-27., 2008.
- [20] I. Yılmaz, M. Marschalko, M. Yıldırım ve E. Dereli, «GIS-based kinematic slope instability and slope mass rating (SMR) maps: application to a railway route in Sivas (Turkey),» Bull. Eng. Geol. Environ., cilt 71, no. 2, pp. 351-357, 2012.
- [21] S. Tudes, Ş. Ceryan ve F. Bulut, «Geoenvironmental evaluation for planning: an example from Gumushane City,» Bull. Eng. Geol. Environ., cilt 71, no. 4, pp. 679-690, 2012.
- [22] S. Alemdag, A. Akgun, A. Kaya ve C. Gokceoglu, «A large and rapid planar failure: Causes, mechanism and consequences (Mordut, Gumushane, Turkey),» Arabian Journal of Geosciences,, cilt 7, no. 3, pp. 205-1221, 2014.
- [23] S. Alemdağ,, G. Zülfü ve C. Özkirişçi, «Bağlarbaşı-Tekke (Gümüşhane) Karayolundaki Kaya Şevlerinin Kinematik ve Limit Denge Yöntemleri İle Değerlendirilmesi,» Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi, cilt 1, no. 1-2, pp. 1-10, 2015.
- [24] E. Hoek ve J. Bray, Rock slope engineering, Third Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1981.
- [25] R. Goodman, Introduction to rock mechanics, 2nd edition, New York: Wiley, 1989.
- [26] D. Wyllie ve C. Mah, Rock slope engineering civil and mining, Spon Press, Taylor and Francis e-library., 2004.
- [27] N. Barton, «Reviw of a newshear strength criterion for rock joints,» Engineering Geology, cilt 7, pp. 287-332, 1973.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 18.01.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 16.03.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.286303	

## EAO'daki enerji kaynaklarının HAD simülasyonu

Ekrem Büyükkaya<sup>1</sup>

### ÖZ

Bu makalede, Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı kullanılarak, karbon yanması ve elektrik ark ile olan enerji üretiminin ve ısı geçişinin modellenmesi yapılmıştır. Hurdanın EAO içerisinde brülörle ısıtılması sırasında gerçekleşen karbon yanması ve elektrik ark radyasyonu ile oluşan ısı enerjisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu nedenle modelleme çalışmalarında karbon partiküllerin ve elektrottan yayılan radyasyonun yanma reaksiyonlarından yararlanılmıştır. Öncelikle partikül yüzeyi ve gaz reaksiyonları, enjekte edilen karbonun yanması irdelenmiştir. Brülör çıkışında kimyasal reaksiyon sonucu, oluşan yanma esnasında çekirdek sıcaklığının yaklaşık 3000 K değerindedir. Cüruf üzerine etki eden sıcaklığın ise 2200 K mertebelerinde olduğu tespit edilmiştir. Radyasyon sıcaklığı elektrotların altında kalan bölgede en yüksek olduğu ve eriyiğin döküldüğü uç kısımla yüklemenin yapıldığı bölgede 1850 K mertebelerine düştüğü belirlenmiştir. Sabit çalışma koşullarında, elektrik enerjisinin % 5.5 civarında elektrotlar tarafından absorbe edildiği görülmüştür. Bu çalışma sonucunda, tasarım aşamasındaki bir elektrik ark ocağı için yanma ve radyasyon ile enerji üretiminin ve ısı geçişinin modellenmesi için HAD yazılımının kullanılabilceği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrik ark ocağı (EAO), hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), Karbon Yanması, Radyasyon Enerjisi

## CFD simulation of energy sources in EAF

### ABSTRACT

Modeling of energy production and heat transfer by carbon combustion and electrical arc is performed using Fluent computational fluid dynamic (CFD) software in this manuscript. The heat energy generated by carbon burning and electric arc radiation during combustion of the scrap in the EAO has been examined in detail. For this reason, modeling studies have utilized the combustion reactions of carbon particles and electromagnetically emitted radiation. Firstly, particle surface and gas reactions are investigated in terms of injected carbon burning. The result of the chemical reaction at the burner outlet is about 3000 K of the core temperature during combustion. It has been determined that the temperature which acts on the slag is 2200 K. The radiation temperature was found to be highest in the area under the electrodes and fell to 1850 K in the area where the melt was poured. Under steady operating conditions, it was seen that electric energy was absorbed by about 5.5% of the electrodes. As a result of this study, CFD software can be used to model combustion and radiation and energy generation and heat transfer for an electric arc furnace at the design study.

**Keywords:** Elektrik arc furnace (EAF), Computational fluid mechanic (CFD), Carbon Combustion, Radiation Energy

<sup>1</sup> SAÜ. Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü 54187 Esentepe-Kampüs/Sakarya

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sanayi tipi elektrik ark ocağındaki (EAO) hurdanın, ergime sıcaklığına çıkarılabilmesi için büyük miktarda kimyasal enerjiye ve elektrik enerjisine ihtiyaç vardır. Dünya çelik üretiminin yaklaşık %30'u EAO' lı tesislerde yapılmaktadır. Ülkemizde toplam çelik üretiminin yaklaşık dörtte üçü ark ocağına sahip tesislerde, geri kalanı ise demir-çelik üretimi yapan tesisler tarafından üretilmektedir. [1,2]. Yüksek kapasiteli modern bir ocak her yüklemde maksimum 350 tona kadar hurda işleyebilir. Bu işlem yaklaşık 50-60 dakika sürer ve EAO'da üretilen her ton çelik için yaklaşık 6-8 GJ enerji tüketilir. Bu tüketim entegre tesislerde yapılan çelik üretimi esnasındaki tüketimin yarısı olmakla birlikte 100000 nüfuslu bir şehrin elektrik enerjisi tüketimine eşdeğerdir. Dünyada toplam çelik üretim kapasitesi yaklaşık 1.5 milyar ton/yıl olduğu düşünüldüğünde küçümsenmeyecek kadar yüksek enerji tüketimlerinin olduğu görülmektedir. 2015 yılında, Türkiye'nin çelik ürünlerindeki toplam tüketimi, 2014'e göre %20.1 artmıştır. 2017 yılına gelindiğinde, çelik ürünleri üretiminin %12, tüketiminin ise %8 artış göstereceği tahmin edilmektedir. [2]. Enerjiyi oldukça fazla kullanan demir çelik sektörünün, sanayinin enerji tüketimi içerisindeki payı %22 iken Türkiye'nin toplam enerji tüketimi içerisindeki payı ortalama %5 mertebelerindedir [1, 2].

Demir çelik sektörü kapsamında yapılan istatistiklerden de görüleceği üzere her geçen yıl çelik üretimi artmaktadır. Bu durum, birim üretim başına tüketilen enerji miktarının azaltılması yönünde önemli çalışmaların yapılmasını zorunlu kılmıştır. Çelik üretiminin her yıl artmasıyla birlikte, birim üretim başına harcanan enerji miktarının azaltılması yönünde yapılan çalışmalar, sektörde harcanan enerjinin büyüklüğü göz önüne alındığında bir hayli önem kazanmaktadır. Çünkü çelik üretiminde kullanılan enerjinin yaklaşık %50'si çeşitli nedenlerle kullanılabilir enerji açısından kayıp olarak harcanmaktadır [3].

EAO' ların daha az elektrik enerjisiyle ve daha verimli yanma stratejisi ile çalışmasını sağlamak, kaynakların verimli kullanılması açısından önemlidir. Demir çelik sektörü için de ergitme süresini azaltan ve ergitme için ton başına maliyeti düşüren çözümler vardır. Bununla birlikte EAO'ların verimlerini arttırmak için kimyasal enerjiden daha fazla faydalanılması ve istenilen

anda yüksek gücün elde edilebilmesi gerekir. Bunun için ergitme işlemi esnasında ilave edilen hurda malzemesinin enerji kaybına sebep olmadan ocak içerisine yüklenebilmesi, ön ısıtmayı sağlayan brülör sayısının, konumunun ve enjektör püskürtme açılarının belirlenmesi, ocak içerisindeki sıvı akışkanın hızlı ve ideal şartlarda boşaltılması gibi faktörlerin ön planda tutulması gerekir. EAO da enerji dengesi gereği yaklaşık %60-65'lik bir enerjiyi elektrik enerjisi oluşturmaktadır. %30-35 lik kısmı ise kimyasal enerji ile sisteme giren enerjidir. Burada kapağın açılmaması ve karbon enjeksiyonu ile köpüklü cüruf ile çalışılması durumunda elektrik enerjisi yerine kimyasal enerjide %4-5'lik bir artış sağlandığı bilinmektedir [4]. Elektrik enerjisinin ise yüksek bir bölümü hurdayı ergitirken harcanmaktadır. Elektrik enerjisindeki tasarruf ancak ocakta ergime sağlanıp elektrotlar cürufa gömülü çalışırkenki elektrik enerjisinden kimyasal enerji miktarının arttırılması ile sisteme ekstra enerji girdisi yaparak sağlanabilir. EAO'nda kimyasal enerji ile enerji girdisinin ancak %30-35'ı sağlanabilmektedir.

Büyük hacimli ve endüstriyel amaçlı EAO için deneysel düzeneklerin kurulmasının zorluğu, ticari amaçlı EAO üretiminin çok maliyetli olması ve uzun sürmesi gibi nedenlerle tasarımın geliştirilmesi için modelleme yapılması önem arz etmektedir. Bu kapsamda yapılmış literatür çalışmaları incelendiğinde ark ocaklarına yönelik nümerik çalışmaların azlığı dikkati çekerken EAO' ye ait deney düzenekleri kapsamlı ve çok pahalı olduğundan dolayı açık literatürde pratiğe yönelik deneysel çalışmaya hiç rastlanılmamıştır.

Kompleks fiziksel olayların hesaplanmasında HAD yönteminin kullanımının yaygınlaşmaya başladığı yıllarda EAO üzerine yapılan ilk çalışmalar Ushio ve ark. [5] ve daha sonra Szekely ve ark. [6] tarafından yapılmıştır. Çalışmalarında EAO sistemini ark ve hazne bölgelerini Navier Stokes, enerji korunumu ve Maxwell denklemlerini kullanarak modellemişlerdir. Farklı ısı transferi modellerini kullanarak arktan hazneye doğru olan enerji geçişini HAD ile ilk modelleyen araştırmacılarıdır. Alexis ve diğerleri [7] EAO sisteminde plazma sıcaklığı, basınç ve hızı hesaplamak için enerji, kütle ve momentum korunum denklemleri ile birlikte Maxwell denklemlerini kullanarak çözmüşlerdir. Yaptıkları sayısal çözümlerden arktan çıkan enerjinin %18 'inin doğrudan metal hazneye ulaştığını ayrıca %2'lik bir kısmında elektrot tarafından absorbe

edildiği, geri kalan %80'lik kısmın ise radyasyon enerjisi olarak EAO içerisine yayıldığını belirtmişlerdir. Sunulan projemizde EAO' de termokimyasal olaylar sonucu ortaya çıkan enerjinin tespiti için önceki çalışmalardan farklı olarak detaylı bir yanma simülasyonu yapılacaktır. Yanma, sistem içerisine giren gerçek yakıt ve hava miktarlarının yanma reaksiyonları kullanılarak oluşturulacaktır.

Li ve Fruehan [8] çalışmalarında üç adet elektrodun bulunduğu fakat haznenin modele eklenmediği silindirik bir EAO için üç boyutlu model kullanmışlardır. Bu model üzerinden detaylı bir HAD analizi ile EAO'larda yanma sorası reaksiyonlarını, akış, radyasyon ve konvektif ısı geçişini aynı anda çözmeyi başarmışlardır. HAD analizi sonucunda sistem içerisine giren enerjinin büyük kısmının radyasyon (EAO yan duvarları ve üst kapak) ve baca gazları ile sistemden çıktığını ayrıntılı sayısal verilerle tespit etmişlerdir. Baca gazları ile sistem dışarısına çıkan enerjinin, üretilen toplam enerjinin %30'u olduğunu tespit etmişlerdir. Toplam enerjinin %12'lik kısmının radyasyon enerjisi olarak metal erigiğe aktarıldığını, %56'lık kısmının radyasyon ile EAO yan ve üst duvarlarına geçtiğini bildirmişlerdir. Bu çalışmada, sıvı cüruf yada elektrotlardaki CO<sub>2</sub> ve C arasında reaksiyona giren radyasyon, ısı iletimi, son yanma reaksiyonları ve sonrasındaki yanma reaksiyonu simüle etmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında, elektrik arkından radyasyonla ısı iletiminin EAF'deki metal karışımını eritmek için önemli bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir [4].

Guo and Irons [9] tipik bir endüstriyel EAO içerisindeki radyasyon enerjisi dağılımını tespit etmek için 3 boyutlu bir model üzerinde HAD yöntemini kullanmışlardır. Modelledikleri EAO geometrisi silindirik bir üst gövde içinde üç adet elektrik ark kaynağı ve alt kısmı silindirik bir gövdeye bağlı hazneden oluşmaktadır. Radyasyon enerjisinin cüruf içindeki dağılımını belirlemek için 3 boyutlu modele cüruf hacmini de eklemişlerdir. Yaptıkları modelleme çalışması ile yan çeper yansıtıcıları, su ile soğutulan yan yüzeyler ve ocak çatısındaki radyasyon enerjisi dağılımını tespit etmişlerdir. Sayısal hesaplamaların sonucunda grafit elektrotların en yüksek ortalama sıcaklığının 3600 K olduğunu bulmuşlardır. Ayrıca elektrotlardan iletimde olan ısı kaybının toplam elektrik enerjisinin % 0.3'lük bir kısmı olduğunu hesaplamışlardır. Guo'nun çalışmasına dayanarak, mevcut modelde ısı

transfer katsayıları, duvarların radyasyon yayılımı ve elektrik ark yüzeyleri üzerine bazı varsayımlar uygulanmıştır. Son yıllarda geliştirilen hesaplama yöntemleri, türbülans ve radyasyonun yanı sıra katı partikül (karbon) yanması ve buharlaşma gibi iç içe geçmiş fiziksel problemlerini de çözebilmektedir.

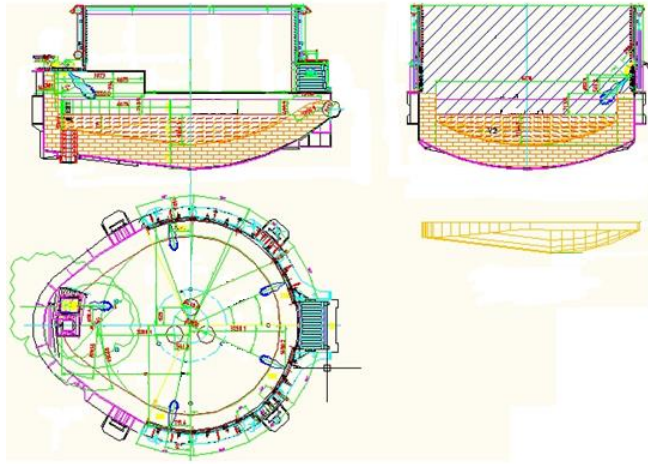
Bu çalışmada, literatürdeki çalışmalara göre gerçek çalışma şartlarına yakın bir EAO simülasyon metodolojisi geliştirmek için HAD yazılımı kullanılmıştır. Bunun için özellikle karbon yanması ve radyasyon ısı aktarım işlemi için kapsamlı bir üç boyutlu HAD modeli geliştirmek amaçlanmıştır. Çünkü Guo ve Irons tarafından yapılmış çalışmadan farklı olarak cüruf kısmının da modele eklenerek radyasyon enerjisinin cüruf içindeki dağılımının incelenerek literatürdeki önemli bir açık kapatılmış olacaktır. Bunun için radyasyon çözümünün HAD yazılımında mevcut olan EAO radyasyonunu doğru ve hızlı bir şekilde çözdüğü bilinen P1 radyasyon modeli kullanılmıştır.

EAO için kapsamlı bir CFD modeli oluşturmak için önemli hedeflerden biri, simülasyonların doğruluğunu analiz etmek ve doğrulamak için enjekte edilen karbonun, elektrik ark radyasyonunun ve cüruf yüzey sıcaklık dağılımı önem arz eder. İyi cüruf köpük üretiminin sağlanabilmesi için CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir [8]. Bunun için püskürtülecek karbon ve oksijenin cüruf yüzeyi ile yaptığı açının doğru bir şekilde belirlenmesi ve brülör sayısının çok iyi ayarlanması gerekir. Bu modelde, enjektörlerin yeri ve/veya miktarı, enjeksiyon açısı, EAO'nun yanma odası boyutları, oksijen veya karbon içerikleri ve elektrotların ışınım oranları vbg. cüruf yüzeyi üzerinde hedeflenen sıcaklığa ulaşmak için değişkenlik gösterebilir. Bu kapsamda tasarım parametreleri üzerine model esneklik sağlar. Bu parametrelere yönelik bir HAD modeli, bir EAO'nda enerji tüketimini azaltmak için yanma ve elektrot ışınımının optimizasyonunu sağlayabilir. Böylece bu çalışma ile demir-çelik sektöründeki Ar-Ge amaçlı teorik çalışmalara öncülük edecek ve açık literatüre önemli bir katkı sağlanacaktır.

# 1. SAYISAL HESAPLAMA BÖLGESİNİN OLUŞTURULMASI (FORMING A NUMERICAL CALCULATION AREA)

## 2.1. EAO'nun geometrisi (Geometry of EAF)

Elektrik ark ocağı Ansys-Fluent 14/Design Modeler programı kullanılarak 3 boyutlu olarak çizildi. Ocağın boyutları CVS Makine San. ve Tic. A. Ş. tarafından verildi. Şekil 1'de EAO'nun üç görünüş resmi gösterilmektedir. Üç boyutlu modeli oluşturmak için EAO'nun iç boyutlarının yüksekliği 3505.25 mm, yarıçapı 3600 mm, cüruf yüzey yarıçapı 3080 mm, ark boyu 320 mm. ve elektrot yarıçapı 305 mm dir.

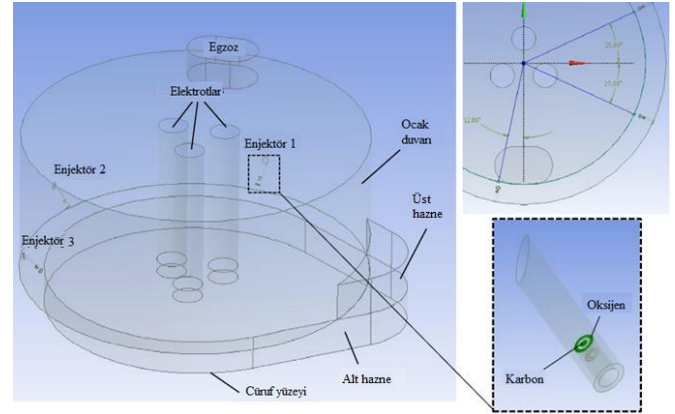


Şekil 1. Elektrik ark ocağının teknik resmi (Technical drawing of electric arc furnace)

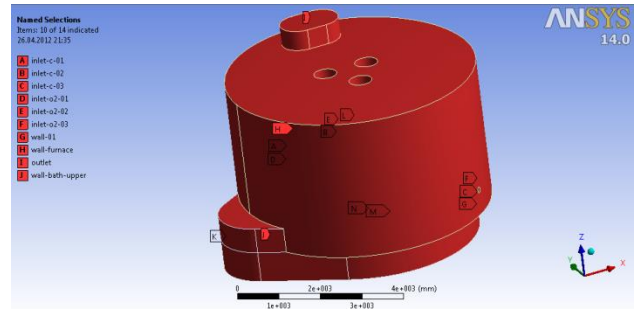
## 2.2. EAO'nun mesh yapısı ve sınır şartları (Mesh structure and boundary conditions of EAF)

Şekil 1'deki ölçüler temel alınarak çizilen hesaplama bölgesi, Şekil 2' de gösterilmektedir. Enjektörlerin x-y koordinatlarındaki açıları yine Şekil 2' de verilmiştir. (+) x eksenini üzerindeki açıları, enjektör 1 için  $25^\circ$ , enjektör 2 için  $-25^\circ$  ve enjektör 3 için  $-102^\circ$  olarak alınmıştır. Tüm enjektörler cüruf yüzeyinden 1.07 m yükseklikte olup  $45^\circ$  açı ile aşağı bakacak şekilde ayarlanmıştır. İyi cürufllu köpük üretiminin sağlanabilmesi için CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir [8]. Bunun için püskürtülecek karbon ve oksijenin cüruf yüzeyi ile yaptığı açının doğru bir şekilde belirlenmesi ve miktarlarının çok iyi ayarlanması gerekir. C ve  $O_2$ , Şekil 2'de sağ altta gösterildiği gibi enjektör vasıtasıyla ocak içerisine gönderilmiştir. Modelin

ana amaçlarından biri, erimiş tabakanın üst yüzey sıcaklık dağılımını da elde etmektir. Modeli basitleştirmek için, hesaplamalı alanın alt yüzeyi, cüruf hacminin modellenmesi yerine cüruf yüzeyi olarak kabul edildi. Üç elektrotun alt yüzeyleri elektrik arkı üretir ve sabit ısı akısı ile enerjiyi yayar. Ocak duvarlarının iç yüzeylerini, bacanın üst ve yan duvarlarını içeren sınır koşullarının yerleri Şekil 3' de verilmiştir.



Şekil 2. Model için oluşturulan hesaplama bölgesi ve enjektör konum açıları (Calculation region and injector position angles for the model)



Şekil 3. Sınır şartları (Boundary conditions)

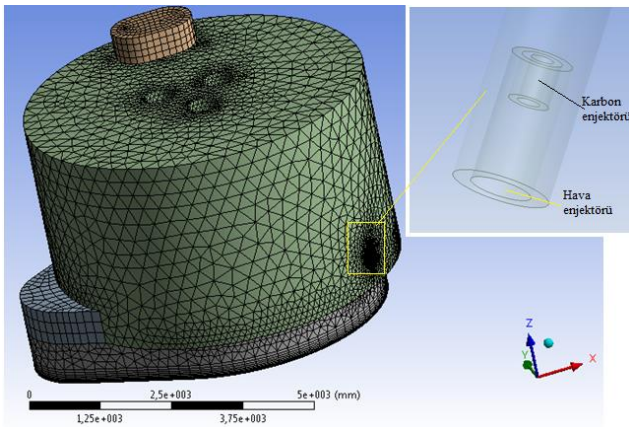
Modelleme çalışmalarında giriş hız değerine yönelik sınır şartları, hızın aksel doğrultudaki bileşeni dikkate alınırken brülör çıkışında radyal yöndeki hız bileşeni ihmal edilmiştir. Brülör çıkışındaki  $O_2$  hızı 480 m/s, her bir brülörden saatte 1200 kg karbonun ocak içerisine girdiği ve ocak çıkışındaki gaz sıcaklığı ise 1873K alındı. Hız girişi ve çıkıştaki basınç için girilen sınır şartlarında türbülans tanımlama yöntemi olarak hidrolik çap ve türbülans yoğunluğu göz önünde bulunduruldu. EAO'nun yüzey sınır şartı için sabit sıcaklık değeri olarak 393K alındı ve elektrotların



alt kısmında 100 MW elektrik enerjisine karşılık gelen ısı akışı girişi tanımlandı. Cüruf yüzeyi üzerindeki ısı transferini göz önünde bulundurarak yüzey sınır koşulunda konveksiyon tanımlandı. Sonuçların doğruluğu açısından modelin ağ yapısı önem arz ettiğinden daha hassas hesaplamalara ihtiyaç duyulan cüruf yüzeyi, elektrotların çevresi ve brülör çıkışına yakın bölgelerdeki ağ dokusu diğer bölgelerdekilere göre daha küçük elemanlardan oluşturuldu (Şekil 4). Sayısal hesaplama sonucunda alınan değerlerin güvenilirliği ağ yapısının kalitesiyle doğrudan ilişkilidir. Bundan dolayı, ağ yapısındaki çarpıklıklar incelendi ve kabul edilir aralıklarda olduğu tespit edildi. Tablo 1'de çarpıklık değerleri, boğum ve eleman sayıları verilmiştir.

Tablo 1. Ağ yapısındaki çarpıklık değerleri, boğum ve eleman sayıları (Distortion values of mesh structure, number of nodes and elements)

Boğum sayısı	93235
Eleman sayısı	450158
Min çarpıklık	8.6807e-05
Max çarpıklık	0.851639
Ortalama çarpıklık	0.243337
Standart sapma	0.136735



Şekil 4. Modelin ağ yapısı (Mesh structure of model)

### 3. EAO'NIN SAYISAL MODELİNİN OLUŞTURULMASI (FORMING THE NUMERICAL MODEL OF EAF)

Fluent yazılımı ile EAO'nun HAD modelinde; türbülanslı akış, yanma reaksiyonları, radyasyon ısı transferi ve diğer fiziksel olaylar için farklı matematiksel çözüm metotlarının kullanılması gerekmektedir. Literatürde bulunan EAO için yapılmış HAD çalışmalarında Launder ve ark.

[11], Fluent yazılımında bulunan P1 radyasyon modeli ile elektrotlardan kaynaklı ışımanın doğru ve hızlı bir şekilde çözebildiğini göstermişlerdir. Bu sebeple HAD modelinde elektrotlardan ve yanma reaksiyonlarından kaynaklı radyasyon için P1 radyasyon modeli kullanılmıştır.

Brülörlere giren akışın türbülans modeli için  $k-\varepsilon$  modeli kullanıldı. Bu model, türbülans kinetik enerji ( $k$ ) ve türbülans harcanım oranını ( $\varepsilon$ ) içeren yarı ampirik bir modeldir [10, 11]. Türbülans kinetik enerjisinin hesaplanması için aşağıdaki formül kullanıldı [12, 13].

$$k = 1.5(uI)^2 \quad (1)$$

$u$ ; brülör çıkışındaki  $O_2$  hızını,  $I$  ise türbülans yoğunluğunu ifade etmektedir.

$$I = 0.16Re^{-1/8} \quad (2)$$

$k-\varepsilon$  modeli için türbülans harcanım oranı;

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4}(k^{3/2}/l) \quad (3)$$

ile ifade edilmektedir. Denklemdaki  $l$  boyut skalası ve  $C_\mu$  model sabitidir. Boyut skalası sınır koşullarına bağlı olarak belirlenmektedir. Hız girişi sınır koşulu için boyut skalası; [8].

$$l = 0.09L \quad (4)$$

ile hesaplanır. Denklemdaki  $L$  brülör çıkışının yarıçapıdır. Karbon partiküllerini taşıyan  $O_2$  akışının oluşturulması için ayrı faz modeli (DPM) kullanıldı [4, 9, 10]. Enjeksiyon tipi olarak yüzey, partikül tipi için yanma seçildi. Karbon partiküllerinin boyutları Rosin-Rammler modeline göre belirlendi. Tablo 2'de partikül çapları verilmiştir. Karbon partiküllerinin yörüngeleri gaz faz içerisinde rastgele olarak hesaplandı.

Tablo 2. Rosin-Rammler modelinde tanımlanan partikül boyutları (Particle sizes defined in the Rosin-Rammler model)

Min çap (m)	Max çap (m)	Ortalama çap (m)	Yayılma parametresi
70e-06	200e-06	134e-06	4.52

Yörüngeler, karbon partiküllerinin üzerine kuvvet dengesi uygulanarak hesaplanabilir. Bu kuvvet dengesindeki karbon partikülüne etki eden atalet

kuvveti olarak yerçekimi, kayma ve dış zorlayıcı kuvvetlerle dengelendiği kabulü yapılmıştır [10].

$$\frac{d\vec{u}_d}{dt} = F_D(\vec{u}_h - \vec{u}_d) + \frac{\vec{g}(\rho_d - \rho_h)}{\rho_d} + \vec{F} \quad (5)$$

Denklemdaki  $u_h$  gaz fazın ( $O_2$ ) hızı,  $u_d$  ayrık fazın (karbon partikülü) hızıdır.  $\rho_h$ :  $O_2$  'nin yoğunluğu,  $\rho_d$ : karbon partikül yoğunluğu,  $g$ : yerçekimi ivmesi ve  $F$ : zorlayıcı dış kuvvetler ile ifade edilmiştir.  $F_D$  kayma kuvvetinin formülü aşağıda verilmiştir [10].

$$F_D = \frac{18\mu_d C_D Re}{\rho_d d^2 24} \quad (6)$$

Denklemdaki Reynold sayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$Re = \frac{\rho_h d |u_d - u_h|}{\mu_h} \quad (7)$$

Denklemdaki  $C_D$  kayma katsayısı olup Reynold sayısının bir fonksiyonu olarak hesaplanmıştır [14].

Karbon partikülleri ile  $O_2$  arasındaki reaksiyon Species Transport Modeli ile tanımlandı. Bu modelde volumetrik ve partikül yüzey reaksiyonları kullanıldı [15].

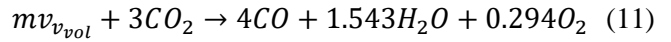
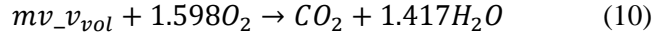
$$m_d c_p \frac{dT_d}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_{fg} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (8)$$

Partiküldeki tüm uçucu bileşenlerin uzaklaşmasından sonra, partikülün yanabilir kısmını tüketen bir yüzey reaksiyonu başlar. Bir yüzey reaksiyonu süresince partikülün ısı dengesi aşağıdaki denklemle ifade edilebilir [14].

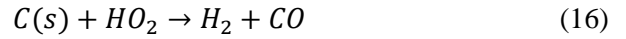
$$m_d c_p \frac{dT_d}{dt} = h A_p (T_\infty - T_p) + \frac{dm_p}{dt} H_{reac} + A_p \varepsilon_p \sigma (\theta_R^4 - T_p^4) \quad (9)$$

Denklemdaki  $H_{reac}$  yüzey reaksiyonu ile salınan ısıdır. Modelde 4'ü volumetrik 3'ü partikül yüzeyinde olmak üzere 7 reaksiyon tanımlandı.

Volumetrik reaksiyonlar:



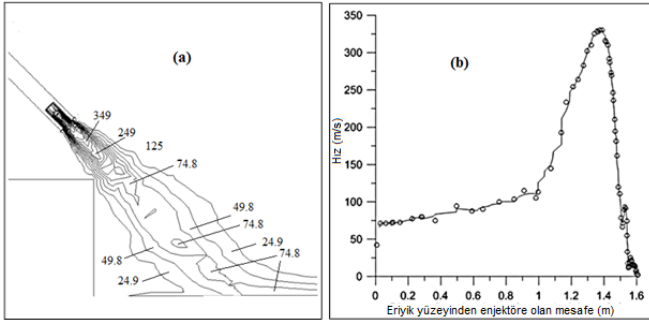
Partikül yüzeyindeki reaksiyonlar:



Nümerik çalışmalarda türbülans, radyasyon, akış, reaksiyon ve enerji denklemleri çözüldü. İlk olarak model I. dereceden sonlu farklar yöntemiyle çözümlendi. Analizin yakınsaması sonrasında elde edilen ilk çözüm modeline başlangıç koşulu olarak girildi. Model yeniden çalıştırılarak ikinci dereceden sonlu farklar çözümüne yönelik bir sayısal analiz yöntemiyle sonuçlar elde edildi.

#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

1 nolu enjektörün merkezini kesen düzlem üzerindeki hız değerleri Şekil 5' de gösterilmiştir. Bu enjektörün hız profilleri Şekil 5'a da, cüruf yüzeyindeki hız grafiği ise Şekil 5'b de verilmiştir. Şekil 5b'de çizilen hız verileri, cüruf yüzeyinden enjektöre doğru olan düz bir çizgiden elde edilmiştir. Ocak içerisindeki  $O_2$  kütle fraksiyonunun dağılımı gösterilmektedir.  $O_2$ 'nin brülör çıkışında 0.07 ve baca çıkışında 0.4 mertebelerinde olduğu görülmektedir. Ocak içerisinde ve cüruf yüzeyinde meydana gelen reaksiyonlar sonucunda  $O_2$ 'nin tükendiği anlaşılmaktadır. Aynı şekilde  $O_2$  akımı ve dış akış için hız değerleri 349 m/s maksimum değerinden sıfır değerine kadar düştüğü görülmüştür. Bu hız değerlerinin düşmesi karbon partikülleri ve gazların karışarak genleşmesinden kaynaklanmıştır. Türbülans ve yüksek sıcaklık yanma etkileri, hız değişimlerini daha büyük hacimleri genişletir. Cüruf yüzeyindeki hız değerleri ise yaklaşık 75 m/s civarında gerçekleşmiştir.

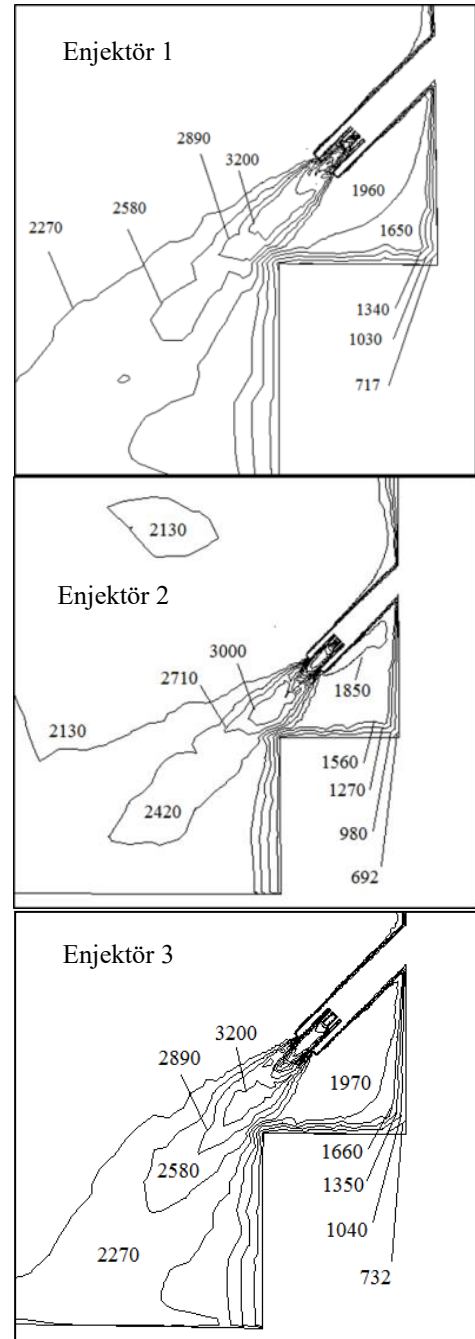


Şekil 5. Enjektör 1'le kesişen bir düzlem için hız (m/s) dağılımı; (a) hız profil eğrisi ve (b) Hızın, cüruf yüzeyinden enjektöre olan değişimi [16] (Velocity value to a plane intersection of the injector 1; (a) Distribution graph of velocity and (b) Variation with slag surface distance of the jet)

EAO içindeki yanma sıcaklık profilleri, enjektörlerin (Enjektör 1, 2 ve 3) merkezinden kesişen bir düzlem için Şekil 6' da sunulmuştur. Enjektör 1 ve 3 çıkışı sonrasında jet akış içerisindeki sıcaklık 2270 K ile 3200 K arasında olduğu görülmüştür. İki enjektör arasında yer alan 2 nolu enjektörün jet akışındaki maksimum yanma sıcaklığı ise 3000 K' dir. Minimum sıcaklık değerleri ise soğutulmuş ocak duvarlarından olan ısı geçişi nedeniyle ocak duvar yüzeylerine yakın yerlerde 692 K olarak belirlendi. Enjektör çıkışındaki maksimum yanma sıcaklıkları cüruf yüzeyi üzerinde 2200 K civarına düştüğü görülmüştür.

Elektrodun alt yüzeyinde tanımlanan radyasyon sıcaklık dağılımı Şekil 7' de verilmiştir. Ocak içerisindeki radyasyon sıcaklığı 2020 K ile 1840 K arasındadır. Sayısal hesaplamaların sonucunda elektrotların en yüksek ortalama sıcaklığının 2200 K olduğunu ve sabit çalışma koşullarında elektrik enerjinin en fazla % 5.5'inin elektrotlar tarafından absorbe edildiği görülmüştür. Bulunan sonuçlar Guo ve Irons tarafından yapılmış çalışmalar ile paralellik göstermektedir [9].

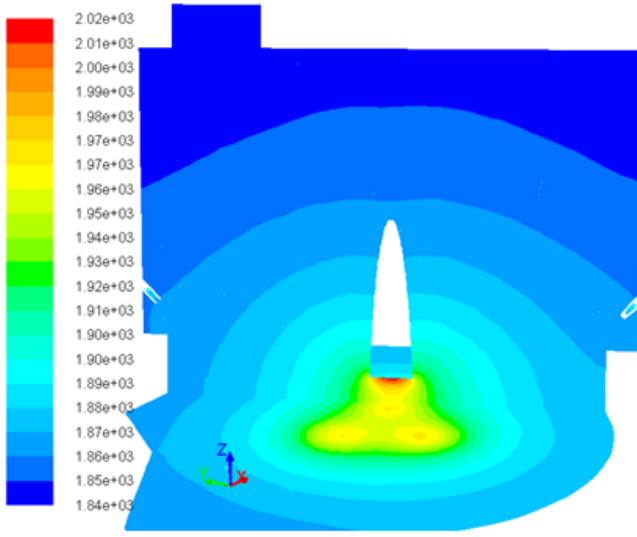
Şekil 8a, radyasyon ve EAF duvarları, cüruf yüzeyi ve bacadan taşınım ile olan ısı geçişini göstermektedir. Işınım ve yanma tarafından üretilen ısı sırasıyla 100.75 MW ve 5 MW'dir. Radyasyonun EAF duvarına ve tavana aktardığı ısı sırasıyla 65.190 ve 26.068 MW'dir. Şekil aynı zamanda 8964 MW ısı enerjisinin ışınım yoluyla metal cüruf yüzeyine iletildiğini göstermektedir. Ayrıca, bacadan olan ısı kaybı sadece 2348 MW'dir. Taşınım ile olan ısı kaybı, ışınım ile karşılaştırıldığında yüzdesel olarak çok düşük olduğundan ısı değişimini gösteren detaylı bir diyagram Şekil 8b'de verilmiştir.



Şekil 6. Ocaktaki üç enjektörün bir düzlem üzerindeki sıcaklık dağılımı (K) (Temperature distribution in a plane of three injectors from the furnace (K))

Çalışmalar sonunda radyasyon ile cüruf yüzeyine geçen ısı miktarı %9 olarak gerçekleştiği ve sonucun Li ve Fruehan'ın yaptığı çalışmadaki sonuç (%12) ile paralel olduğu görülmüştür. Bu durumda toplam enerjinin sadece yaklaşık %10'unun cüruf malzemesine aktarılabilirliğini göstermektedir. Aynı referans çalışmasında [8] radyasyon ile duvara iletilen enerji, toplam enerjinin %45'i iken bu çalışmada %65 değerlerinde gerçekleşmiştir. Bu fark, ocak duvarlarında daha düşük ve değişken termal koşulların uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Cüruf yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 9'de verilmiştir. Cüruf yüzeyi statik sıcaklık değişimi

1860 K ile 1970 K arasındadır ve cüruf yüzeyinin sıcaklığı çoğunlukla 1880 K civarında olduğu ve bu da erime sıcaklığının yaklaşık 1800 K'de tutulması demektir [9,11].



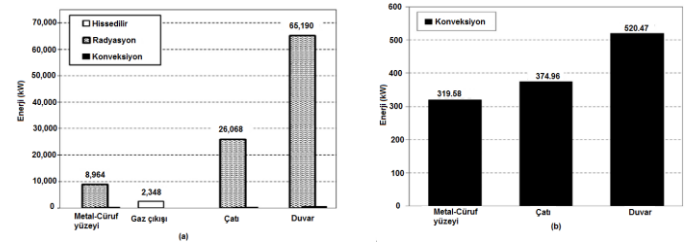
Radyasyon sıcaklık dağılımı (K)

Şekil 7. Bir elektroda ait radyasyon sıcaklık (K) dağılımı (The radiation temperature (K) distribution of an electrode)

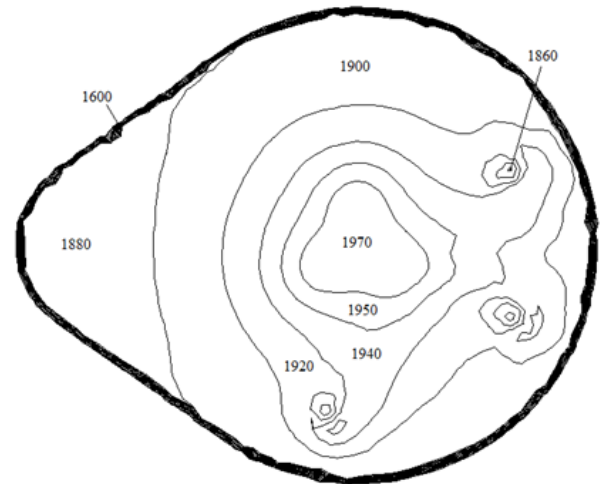
Çalışmalar sonunda radyasyon ile cüruf yüzeyine geçen ısı miktarı %9 olarak gerçekleştiği ve sonucun Li ve Fruehan'ın yaptığı çalışmadaki sonuç (%12) ile paralel olduğu görülmüştür. Bu durumda toplam enerjinin sadece yaklaşık %10'unun cüruf malzemesine aktarılabilirliğini göstermektedir. Aynı referans çalışmasında [8] radyasyon ile duvara iletilen enerji, toplam enerjinin %45'i iken bu çalışmada %65 değerlerinde gerçekleşmiştir. Bu fark, ocak duvarlarında daha düşük ve değişken termal koşulların uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Cüruf yüzeyindeki sıcaklık dağılımı Şekil 9'de verilmiştir. Cüruf yüzeyi statik sıcaklık değişimi 1860 K ile 1970 K arasındadır ve cüruf yüzeyinin sıcaklığı çoğunlukla 1880 K civarında olduğu ve bu da erime sıcaklığının yaklaşık 1800 K'de tutulması demektir [9, 11].

Gerçek şartlarda 5 adet brülör çalışarak, eriyik banyosu oluşuna kadar çalışır ve sonrasında elektrotlar devreye girerek iki brülör tamamen durur. Sadece 3 brülör oksijen ve karbon enjekte etmeye devam ederek hem cüruf oluşumuna hem de elektrotlar ile birlikte enerji üretimine yardımcı olur. Bu işlem ocak içerisindeki malzemeyi tamamen sıvı eriyik ve cüruf oluşumuna kadar devam eder. Bu işlem sonrasında elektrot ile eriyik yüzeyi arasındaki ark boyu 38-48 cm aralığında olduğu ve iyi cürufllu köpük üretiminin

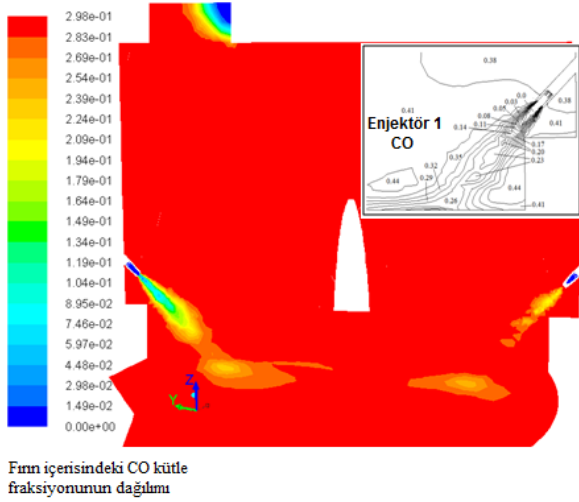
sağlanabilmesi için de CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir [8]. Bunun için püskürtülecek karbon ve oksijenin cüruf yüzeyi ile yaptığı açının doğru bir şekilde belirlenmesi ve yeterli brülör sayısının tespit edilmesi gerekir. Yeterli CO gazının oluşumuna yönelik ocak içerisine gönderilmesi gereken oksijen ve karbon miktarı için 3 adet brülör ile çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Şekil 6 ve Şekil 11). Yine 107 cm yüksekliğe konumlandırılmış brülörlerin köpüklü cüruf oluşumunu sağlaması için yapılan karbon enjeksiyonu, eriyik yüzeyi ile 30°-35°'lik, oksijen ise 42°-48°'lik bir açı aralığında püskürtülmesi ile en iyi CO değerleri elde edilmiştir. Şekil 10 ve 11'de, 1 nolu enjektör çevresindeki CO ve CO<sub>2</sub> kütle fraksiyon dağılımını göstermektedir. Bu enjektör için yanma reaksiyonları sonrası oluşan CO değeri cüruf yüzey difüzyonundan daha düşük olduğu, CO ve CO<sub>2</sub> kütle fraksiyonunun ocak içerisinde sırasıyla yaklaşık 0.298 ve 0.283 mertebelerinde olduğu görülmektedir.



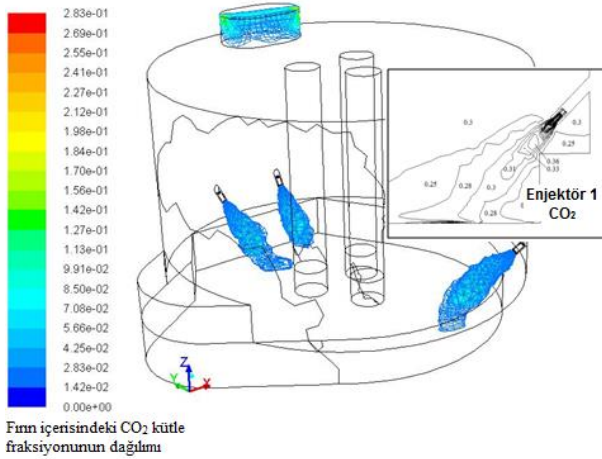
Şekil 8. Ocak içerisindeki taşınım, radyasyon ve atık gazdan elde edilen enerji değerleri [16] (Energy values obtained from transport, radiation and waste gas in the furnace)



Şekil 9. Cüruf yüzeyindeki statik sıcaklık dağılımı (Static temperature (K) on the slag surface.)



Şekil 10. Enjektör 1'in yanma alanındaki CO kütle fraksiyon dağılımı (CO mass fraction distribution in the combustion zone of the injector 1)



Şekil 11. Enjektör 1'in yanma alanındaki CO<sub>2</sub> kütle fraksiyon dağılımı (CO<sub>2</sub> mass fraction distribution in the combustion zone of the injector 1)

## 5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada, enjektörlerin konum ve açılarının optimizasyonuna yönelik enjektörün cüruf yüzeyi ile yaptığı açı, enjektörün EAO yan duvarları ile yaptığı açı ve enjektörün cüruf yüzeyinden itibaren olan yüksekliği gibi kritik öneme sahip brülör parametrelerinin belirlenmesine yönelik bir modelleme çalışması yapılmıştır. Böylece bir ark ocağı için kimyasal mekanizma ile karbon yanmasını ve elektrik ark radyasyonunu birlikte çözümlenerek sistemin tam güçte çalışması anında hazne içerisinde gerçekleşen olaylar incelenmiştir. Çalışmalarımız sonrasında;

1) Enjektörlerle sağlanan jet bölgesindeki yanma ile oluşan çekirdek sıcaklığının cüruf yüzeyindeki sıcaklık dağılımına olan etkisi ve karbon yanma reaksiyonları sonucu oluşan CO ve CO<sub>2</sub> gazlarının

EAO içerisindeki dağılımı görsel ve sayısal verilerle HAD modelleme ile ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir. Böylece cüruf yüzeyindeki toplam ve ortalama sıcaklık dağılımı, gerçek koşullarla uyumlu olduğu görülmüştür. Elektrotların tam altındaki metalin sıcaklığı, tamamen fırın kapasitesinin elektrotlara verilen akım ve elektrot çaplarıyla doğrudan ilişkili olduğu ve elektrot altındaki metal sıcaklık değerinin 3000 K civarında olması literatür çalışmaları ile de paralellik gösterdiği görülmüştür [7].

2) Elektrot ile eriyik yüzeyi arasındaki ark boyunun 38-48 cm aralığında olduğu ve iyi cüruf köpük üretiminin sağlanabilmesi için de CO gazının önemli bir parametre olduğu bilinmektedir [8]. Yeterli CO gazının oluşumuna yönelik ocak içerisine gönderilmesi gereken oksijen ve karbon miktarı için 3 adet brülörün yeterli olduğu tespit edilmiştir. Yine 107 cm yüksekliğe konumlandırılmış brülörlerin köpüklü cüruf oluşumunu sağlaması için yapılan karbon enjeksiyonu, eriyik yüzeyi ile 30°-35°'lik, oksijen ise 42°-48°'lik bir açı ile püskürtülecek şekilde ayarlanması gerektiği görülmüştür.

3) EAO'nun yanma odası boyutlarına göre brülörlerin yeri ve/veya miktarı, oksijen ve karbon enjeksiyon açısı, oksijen ve karbon miktarları ve elektrotların ışınlam oranları vbg. değerler cüruf yüzeyi üzerinde hedeflenen sıcaklığa ulaşmak için değişkenlik gösterecektir. Büyük hacimli ve endüstriyel amaçlı EAO için deneysel düzeneklerin kurulmasının zorluğu, ticari amaçlı EAO üretiminin çok maliyetli olması ve uzun sürmesi gibi nedenlerle bu çalışma ile elde edilen tasarım parametreleri için literatürdeki açık kapatılmış olmakla birlikte, endüstrideki gerçek ocak içi yanma şartlarına daha gerçek yaklaşım olan cüruf hacmindeki sıcaklık dağılımı ve bu hacme aktarılan toplam enerjinin tespiti için veri ve sınır şartlarının elde edilmesi de açık literatüre önemli bir katkı sağlayacaktır.



4) Aynı zamanda bu çalışma daha az tutarlılık gösteren sıfır boyutlu hesaplama yöntemleri için de alternatif bir yöntem sunmaktadır. Bu yöntem sonucunda EAO'larında ısı geçişinin önemli bir miktarının radyasyonla gerçekleştiği, cüruf yüzeyine geçen ısı EAO duvarlarına ve üst kısmına aktarılan ısıya kıyasla daha düşük olduğu görülmüştür.

## TEŞEKKÜR ACKNOWLEDGMENTS

Bu çalışmaya olan destekleri için CVS Teknoloji Firmasına teşekkür ederim.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Demir Çelik Sektörü Raporu," sayfa 7-8, 2014, www.dogaka.gov.tr
- [2] "Demir-çelik, demir-çelikten eşya sektörü İhracat Genel Müdürlüğü Maden," Metal ve Orman Ürünleri Daire Başkanlığı, sayfa 3-5, 2016.
- [3] Ü. Çamdalı, "Elektrik Ark Fırını Yöntemi ile Çelik Üretin Bir Tesiste Termodinamiğin İkinci Kanununun Analizi," İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1998.
- [4] J. Zhang, W. Prationa. L. Zhang, Z. Zhang, "Computational Fluid Dynamics Modeling on the Air-Firing and Oxy-fuel Combustion of Dried Victorian Brown Coal," *Energy Fuels*, vol. 27, pp. 4258-4269, 2013.
- [5] M. Ushio, J. Szekely, C.W. Chang, "Mathematical modelling of flow field and heat transfer of high current arc discharge", *Iron making and Steel making*, 8, 279-286.
- [6] J. Szekely, J. McKelliget, M. Choudhary, "Heat-transfer fluid flow and bath circulation in electric-arc furnaces and de plasma furnaces," *Ironmaking Steelmaking*, vol. 10, no. 4, pp. 169-179, 1983.
- [7] J. Alexis, M. Ramirez, G. Trapaga, P. Jonson, "Modeling of a DC electric arc furnace-Heat transfer from the arc," *ISIJ Int.*, no. 40, pp. 1089-1097, 2000.
- [8] Y. Li, R. Fruehan, "Computational fluid dynamics simulation of postcombustion in the electric arc furnace *Metallurgical and Materials Transactions*," vol. 34, no. 3, pp. 333-343, 2003.
- [9] D. Guo, G. Irons, "Modeling Of Radiation Intensity An EAF" in *Third international conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, , Melbourne, Australia, p.10-12, 2003.
- [10] ANSYS, Inc. FLUENT, Version 14.0; ANSYS, Inc.: Canonsburg, PA., 2013.
- [11] B.E. Launder, D.B. Spalding, "Lectures in mathematical models of turbulence", Academic Press., London, England, 1972.
- [12] H.K. Versteeg, W. Malalasekera, "An introduction to computational fluid dynamics," *Longman Scientific & Technical*, 1995.
- [13] S.V. Patankar, "Numerical heat transfer and fluid flow", Taylor & Francis Inc, 2007.
- [14] S.A. Morsı, A.J. Alexander, "An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 55, no. 2, pp. 193-208, 1972.
- [15] I.B. Matveev, S.I. Serbin, "Modeling of the Coal Gasification Processes in a Hybrid Plasma Torch," *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 35, no. 6, pp. 1639-1647, 2007.
- [16] C. Yigit, G. Coskun, E. Buyukkaya, U. Durmaz, H.R. Güven, "CFD modeling of carbon combustion and electrode radiation in an electric arc furnace", *Applied Thermal Engineering*, 90, 831-837, 2015

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 24.10.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 20.03.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.337271	

## Yol yüzey işaretlerinde kullanılan malzemeler ve geri yansımaya özellikleri üzerine bir literatür taraması

Metin Mutlu Aydın\*<sup>1</sup>

### ÖZ

Ülkemizde şehir içi ve şehirlerarası yollar inşaa edildikten kısa bir süre sonra yüzey işaretlemeleri yapılarak hizmete açılmaktadır. Bu yolların hizmete açılmasından belirli bir süre sonra bakımsızlıktan veya diğer sebeplerden dolayı yüzey işaretlemelerinin görünürlüğü azalmakta ya da kaybolmaktadır. Yol yüzeyindeki bu işaretlemeler, sürücülerin şerit kullanımı üzerinde görsel bir rehber olma özelliğinden dolayı kazaları önleme konusunda oldukça hayati bir öneme sahiptir. Ülkemizdeki şehir içi ve şehirlerarası yollarda yol yüzey işaretlemelerine ne yazık ki yeterince önem verilmemektedir. Yolların büyük bir çoğunluğunun yüzey işaretlenmesinin (yüksek kaliteli yollar hariç) ucuz olması dolayısıyla daha çok soğuk boyalar ile yapılması bu işaretlemelerin çok kısa sürede performansını kaybetmesine sebep olmaktadır. Bu durum sonucunda yollarda oluşan karmaşa, şerit disiplinsizliği vb. nedenlerden dolayı birçok trafik kazası meydana gelmektedir. Hâlbuki gelişmiş ülkelerde ülkemizdeki durumun aksine soğuk boya yerine yol ve çevresel şartlara bağlı olarak en uzun dayanıma ve performansa sahip Epoxy, Methyl Methacrylate, Polyester, Termoplastik, Polyurea vb. malzemeler kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında, gelişmiş ülkelerde yol yüzey işaretlemelerinde aktif olarak kullanılan malzeme türlerinin özellikleri ve kullanım alanları üzerine bir literatür taraması yapılmıştır. Sonuçlar yetkililer ile paylaşılmış ve bu malzemelerin ülkemizde de kullanımı konusunda teşvik edici ve bilgilendirici bir kaynak hazırlanmaya çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** yol yüzey işaretlemeleri, şerit çizgisi, geri yansımaya, yol karakteristikleri

### A literature review on road surface marking materials and retroreflectivity properties

#### ABSTRACT

Urban and rural roads are opened to service after the application of road surface markings in Turkey. However, visibility of these roads reduce or disappear caused by the disrepair in a short time after the construction. These road surface markings have a mission to be a visual guide on behavior of lane utilization of drivers. For this reason, it has crucial importance to prevent traffic accidents. Unfortunately, the necessary importance to road surface markings are not given by the authorities in urban and rural roads of Turkey. Generally, standard road marking paint are used in all roads because of its low price and it loses retroreflectivity performance after short time. As a result of this situation chaos, lane indiscipline and many

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Yazar 1 bilgileri

traffic accidents occur in urban and rural roads. Whereas, many different road painting materials are used such as Epoxy, Methyl Methacrylate, Polyester, Thermoplastic, Polyurea etc. to obtain higher performance and resistance according to different road characteristics and environmental conditions. In the scope of this study, a general information were given about the utilization of different surface marking materials which is used in developed countries effectively. Additionally, a number of recommendations and guidance notes have been provided for road makers and decision authorities wishing to use these materials in Turkey.

**Keywords:** road surface markings, lane line, retroreflectivity, road characteristics

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ülkemizin 2015 yılına ait trafik kaza istatistikleri incelendiğinde kazaların yaklaşık olarak %34'ünün havanın karanlık olduğu saatlerde meydana geldiği görülmektedir [1]. Yapılan maliyet analizlerinden bu trafik kazalarından kaynaklı olarak oluşan maddi kayıpların ise 20 milyar TL'yi aştığı hesaplanmıştır [1]. Mevcut araştırmalardan havanın karanlık olduğu saatlerde meydana gelen kazalar üzerinde sürücülerin alkol ve uyuşturucu kullanmış olmasının etkisi, aşırı hız yapma isteği, yol bozukluklarından kaçma arzusu ve davranışı vb. birçok etken olduğu belirlenmiştir [2, 3]. Bu etkenlerden özellikle sürücülerin sınırlı görüş imkânına sahip olması, geceleyin meydana gelen kazaların başlıca sebebi olarak gösterilebilmektedir. Gece yolculuklarında sürücüler için dikkat edilmesi gereken en önemli hususların başında, sürücülerin yeterli görüş mesafesine sahip olması gelmektedir. Çünkü sürücülerin yol üzerindeki herhangi bir cismi, aracı, yayayı vb. engel ya da engelleri önceden görmesi, bu olumsuz duruma karşı daha önce tedbir almasını etkilemekte ve sürücünün kaza yapma riskini azaltmaktadır. Yol yüzey ve kenar işaretlemeleri ise sürücülerin yolculuk esnasında yeterli görüş mesafesine sahip olmasını sağlayan en önemli uyarıcılardan birisidir. Bu uyarıcılardan özellikle yol yüzey işaretlemeleri, sürücülerin şeritlerini güvenli şekilde takip ederek diğer araçlar ile arasındaki mesafeyi korumasını ve en önemlisi aracın bir şerit içerisinde düzenli hareket etmesini sağlamaktadır. Bu yüzden sürücülerin yol üzerindeki görüş mesafesinin artırılması kazaların azaltılması üzerinde anahtar bir öneme sahiptir. Yapılan araştırmalardan yol yüzey işaretlemelerine gerekli bakımın yapılmaması dolayısıyla, sürücüler için yeterli görüş mesafesinin oluşmamasının kazaların başlıca sebeplerinden birisi olduğu gözlemlenmiştir [4, 5].

Ülkemizde şehir içi ve şehirlerarası yollar inşaa edildikten kısa bir süre sonra yol yüzey işaretlemeleri yapılarak hizmete açılmaktadır. Şehirlerarası yollarda inşaat sonrası yapılan yol yüzey işaretlemelerinin kalitesiz olması ve periyodik olarak bakım yapılmaması dolayısıyla bu işaretlemeler de belirli bir süre içerisinde etkinliğini kaybetmektedir. Şehir içi yollarda ise sürekli devam eden altyapı çalışmaları ya da yol kenarında devam eden inşaatlar nedeniyle bu yollardaki yüzey işaretlemelerinin görünürlüğü kısa süre içerisinde azalmakta ya da kaybolmaktadır. Özetle hem şehirlerarası hem de şehir içi yollarda bu durum üzerindeki temel sebeplerin başında, kalitesiz malzeme kullanımı ve işaretlemelerin bakımlarının düzenli yapılmaması gösterilebilir. Başta ABD, İngiltere, Avustralya olmak üzere gelişmiş ülkelerdeki şehir içi ve şehirlerarası yollardaki yüzey işaretlemelerinin görünürlüğü incelendiğinde durumun ülkemizdeki gibi olmadığı, aksine yüksek görünürlüğe sahip yol yüzey işaretlemelerinin kullanıldığı görülmektedir. Gelişmiş ülkelerdeki şehir içi ve şehirlerarası yollarda bu yüksek çizgi görünürlüğü araçları kanalize ederek trafikte karmaşıklığı önleme, araçların yol kenarı park ettikleri yeri düzenleme ve kontrol etme, kazaları önleme vb. birçok pozitif etkiye sahiptir. Bu çalışma kapsamında, ülkemizde büyük bir sorun olan yol yüzey işaretlemelerinin görünürlüğünü araştıran çalışmalar incelenerek, bu sorunlu duruma yetkililerin, ilgili kurum ve kuruluşların dikkatini çekmek ve elde edilen bulguları özetleyerek yol gösterici bir kaynak hazırlanması amaçlanmıştır.

## 2. YOL YÜZEY İŞARETLEMELERİ (ROAD SURFACE MARKINGS)

Yol yüzey işaretlemeler, sürücülerin şerit kullanımı üzerinde görsel bir rehber olma özelliğinden dolayı oldukça önemli bir role sahiptir. Genel olarak yol yüzey çizgilerinin çoğu, kuru yüzey koşullarında istenilen görselliği sağlayarak, sürücülerin şerit seçim ve



kullanımında uyarıcı olarak etkin bir görev alabilmektedir. Fakat bu malzemelerin görseelliği özellikle ıslak ve gece koşulları altında oldukça azalmaktadır [6]. Çünkü yol yüzeyinin ıslak olması durumunda bu işaretlemeler su ile kaplanmakta ve görseelliğinde kısmi ya da tamamen azalma görülebilmektedir [7]. Bu durumun sebebi ise su birikintisi üzerine gelen ışığın işaretlemeye ulaşmadan dağılması ve yüzey işaretlemesinden tamamen geri yansımak yerine göreceli şekilde (kısmi) yansımasıdır. Bu geri yansıma özelliğinin değişmesi sonucu ise ne yazık ki sürücüler için daha kısa görüş uzunluğu oluşmaktadır [8].

İyi yol yüzey işaretlemeleri, araçların güvenli şekilde yolculuk yapabilmeleri için oldukça önemlidir. Yol yüzey işaretlemelerini etkin şekilde yönetmek (bakım) ise oldukça zor bir işlemdir. Son 20 yıllık süreçte Dünyada yüzey işaretlemelerinin performansını görsel yöntemlerle belirlemeye yönelik birçok çalışma yürütülmüştür [9-21]. Örneğin Schnell vd. [9] çalışmasında, üç tür işaretleme tipinin performansını incelemiştir. Bunlar düz, desenli ve yağışlı havada yansıyan işaretleme tipleridir. Schnell vd. [9] bu üç tür işaretleme tipinin yanı sıra üç farklı yol yüzey durumu için de (kuru, nemli (ıslak) ve su kaplı yol yüzeyi) aynı araştırmayı gerçekleştirmiş ve aynı test aracını kullanan 19 farklı sürücünün (11 erkek ve 8 kadın) bu üç durumda ne kadar uzağı gördüklerini retroreflektometre (geri yansıma ölçüm) cihazı ile ölçmüştür (Aynı zamanda göz izleme yöntemi de kullanmıştır). Yapılan ölçümler ile yüzey işaretlemelerinin performansı ASTM [22] standartlarına göre incelenmiştir (ASTM E1710 (kuru), ASTM E2177 (Nemli Yüzey), ASTM E2176 (Su kaplı yüzey)). Çalışma sonucu her üç işaretleme tipi içinde en uzak mesafeye ilişkin görüş uzunluğunun kuru yüzey için olduğu belirlenmiştir. Çalışma ile ayrıca ıslak yüzeyde gözün daha sabit olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bir diğer çalışmada ise Aktan ve Schnell [10] büyük boncuklu kalıcı yüzey kaplamalarının gece görünürlüğünü iki desenli tür ile (yüksek indeksli boncuklar ve karışık yüksek indeksli boncuklar) kuru, ıslak ve simule yağmur koşulları için inceleyerek karşılaştırmıştır. Analizlerden, karışık yüksek indeksli boncukların üç koşul içerisinde en iyi performansı verdiği gözlemlenmiştir. Çalışma ile büyük boncuklu kalıcı yüzey kaplamalarının, büyük boncuklu kalıcı yüzey işaretlemeleri ile ıslak yüzey ve yağmurlu hava için karşılaştırılabileceği belirlenmiştir. Çalışma

sonuçlarından ayrıca, kuru koşullar için en kötü performansı büyük boncuklu kalıcı yüzey kaplamalarının verdiği saptanmıştır. Texas Ulaştırma Departmanı (TxDOT) [24] tarafından desteklenen bir başka çalışmada ise Carlson vd. [11, 12] geniş aralıklı yüzey işaretlemelerinin performansını kuru ve ıslak koşullar için incelemiştir. Çalışmada, yükseltilmiş kaplama işaretlemelerine (RRPMs) ek olarak su bazlı trafik boyası, termoplastik, dayanıklı bant, epoxy, polyurea ve methyl methacrylate içeren farklı yol yüzey işaretlemeleri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ayrıca işaret genişliklerinin 10,2 (4,02 inç) ile 15,2 (5,98 inç) cm olması ile plastik şerit işaretlemelerinin ıslak kaplama yüzeyi durumundaki görünürlüğü de incelenmiştir.

Çalışma sonuçlarından yükseltilmiş kaplama işaretlemeleri için gece ve ıslak yüzey için görüş mesafesi 168 metre olarak ölçülmüştür ki bu değer test edilen diğer malzemelere göre 61 metre daha uzun olduğu belirlenmiştir. Çalışma kapsamında ayrıca, dayanıklı bantların yükseltilmiş kaplama işaretlemeleri (RRPMs) dışındaki diğer malzemelere göre daha iyi performans verdiği de gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçlarından 10,2 cm genişliğindeki şerit çizgilerinin 15,2 cm genişliğindeki şerit çizgilerine göre %30 daha uzun mesafeyi görmeyi sağladığı belirlenmiştir.

Yol yüzey işaretlemelerinin kullanımı işaretleme türlerine göre önemli değişiklikler göstermektedir. Bu işaretlemeler enine, boyuna, sembol, kelime veya özel işaretlemeler olabilmektedir. Burada özellikle boyuna doğrultudaki işaretlemelerin, araçların şerit kullanımı üzerinde etkili olması oldukça önemlidir. Boyuna doğrultudaki işaretlemeler; yol eksen işaretlemeleri, kenar işaretlemeleri ve şerit çizgileri olmak üzere üç farklı şekilde sınıflandırılabilir. Bunlardan yol eksen işaretlemeleri karşıdan gelen trafik akımlarını ayırmada kullanılır ve sürekli (sarı (ABD'de) veya beyaz renklindedir). Kenar işaretlemeleri bir sürekli şerit çizgisi ya da sürekli ve kesikli çizgilerin birleşiminden oluşmaktadır. Şerit çizgileri ise beyaz veya sarı renkli olmakta ve şeridin kenarını göstermektedir. Şerit çizgileri sollamaya izin verilmeyen bölgeler dışında sürekli olarak kesikli çizgilerden oluşmaktadır. Ayrıca noktalı beyaz çizgiler şerit birleşimlerini göstermek için kullanılmaktadır. Yol yüzey işaretlemelerinin görünürlüğü birçok parametreden etkilenmektedir. Yapılan araştırmalardan elde edilen sonuçlara göre bu

faktörler ana ve diğer parametreler olmak üzere Tablo 1’de verilen şekilde özetlenmiştir [24-26].

Yol yüzey işaretlemelerinin görünürlüğü üzerinde etkili olan anahtar parametreler ve bunların görünürlük üzerinde nasıl bir etkisinin olduğu ise Tablo 2’de detaylı olarak açıklanmaktadır [25].

Tablo 1. Yol yüzey işaretlemelerinin görünürlüğü üzerinde etkili olan ana ve diğer parametreler (Effective main and different parameters on visibility of road surface markings) [24-26]

Ana Parametreler	Diğer Parametreleri
Kaplama işaretleme geri yansımaları	Kaplamanın aşınması
Kaplama yüzey malzemesi	Kaplama işaretleme açısının bozulması
Araç türü	Yol eksen çizgisinin bulunması
Araç ön farı	Şeritler arasındaki yanıl ayırıcılar
Sokak aydınlatması	İşaretlemede geri yansımaya alanının mevcudiyeti
Kenar çizgilerinin varlığı	Ön cam iletimi
Geniş boyuna işaretlemeler	Sürücünün çalışma yükü
Yükseltilmiş yüzey işaretlemelerinin varlığı	Sürücü dikkati
Sürücü yaşı	Ufuk çizgisi/Gökyüzü parlaklığı
Sürücünün algı süresi	Atmosferik iletkenlik
Yıllık ortalama günlük trafik (YOGT)	Hava koşulları

Tablo 2. Yol yüzey işaretlemelerinin görünürlüğünü etkileyen anahtar parametreler (Key parameters on visibility of road surface markings) [25]

Parametre	Yüzey İşaretlerinin Görünürlüğüne Etkisi
İşaret geri yansımaları (Retroreflektivitesi)	Yol yüzey işareti geri yansımadaki artış sürücünün gördüğü uzunluğu arttıracaktır.
Yol yüzey malzemesi	Yeni asfalt yol yüzey işaretlemeleri için en iyi parlaklık kontrastlığını ve en iyi görünürlüğü sağlar. Yaşlı beton ve asfalt görünürlüğü azaltmaktadır.
Araç tipi	Genellikle araç farı ve sürücü göz hizasının kaplamadan yüksek olması daha iyi görünürlük sağlamaktadır.
Araç farı	Yeni araç farları görünürlüğü arttırmaktadır.
Yol aydınlatması	Yol üzerindeki aydınlatmalar görünürlüğü arttırmaktadır.
Kenar şerit çizgilerinin varlığı	Kenar çizgilerinin eklenmesi işaretlemelerin görünürlüğünü arttırmaktadır.
Geniş boyuna işaretler	Çizgi kalınlığının artması işaretlemelerin görünürlük mesafesini arttırmaktadır.
Yükseltilmiş kaplama işaretinin varlığı	Diğer işaret türlerine göre daha uzun mesafelerden görünebilmektedir. Ayrıca işaretlemelerin görülmesindeki algı süresini azaltmaktadır.
Sürücü yaşı	Yaşlı sürücülerin görsel performansı genellikle düşüktür ve genç bir sürücüye göre aynı uzaklıktaki işareti görebilmek için daha fazla geri yansımaya gerek duyarlar.
Algı süresi	Uzun ön izleme süresi sürücülere daha fazla konfor sağlamaktadır.

### 3. YOL YÜZEY İŞARETLEMELERİNDE KULLANILAN MALZEMELER (ROAD SURFACE MARKINGS MATERIALS)

Yol kenarı ve yol yüzey işaretlemelerinin yönetimi, ulaşım altyapısı ve trafik güvenliği için oldukça önem teşkil etmektedir. Çünkü yol yüzey işaretlemeleri trafik kazalarını azaltma, şerit disiplinini sağlama vb. birçok olumlu etkiye sahiptir. Fakat yol yüzey işaretlemelerinin yönetiminde karşılaşılan en büyük sorun, yol yüzey işaretlemelerinin ömrüdür. Bu işaretlemeler ortalama 1-8 yıl arasında değişen faydalı ömre sahiptir. Bazı özel malzeme kullanımı ile trafik ve çevresel koşullarda bu süre, daha da uzayabilmektedir. Yol yüzey kaplamalarının

performansını etkileyen birçok sayısal parametre bulunmaktadır. Bunlardan işaretlemelerin genişliği, uzunluğu ve kalınlığı kolaylıkla ölçülebilmektedir. Geri yansımaya özelliğinin performansı ise özellikle gece koşullarında oldukça önem teşkil etmesine rağmen sayısal olarak basit standart yöntemlerle ölçülebilmektedir. Yol yüzey işaretlemelerinin performansı temel olarak görsel ve dayanım parametreleri olarak iki ana kategoriye ayrılarak incelenebilmektedir. Her bir kategoriye ait ana parametreler Tablo 3’te verilen şekilde özetlenmiştir [27].

Tablo 3. Yol yüzey işaretlemelerinin performansını etkileyen parametreler (Effective parameters on performance of road surface markings) [27]

Görsel Faktörler	Dayanım Faktörleri
Zıtlık	İşaretin malzemesi
Geri yansıma özelliği	İşaretin kalınlığı (kenar veya merkez)
Kaplama yüzeyi	Kaplama tipi
Kaplama rengi	Kaplama yüzeyi
İşaret rengi	Trafik hacmi
İşaret tipi	Hava durumu
İşaret boyutları	Bakım aktiviteleri
Araç far tipi	İşaretin konumu (kenar veya merkez)
Bakış geometrisi	Yol geometrisi (yatay kurba, dalgalı alanlar vb.)
Ortamın aydınlatma koşulları	

Sürücülerin güvenliğini, konforunu arttırmak ve maliyeti azaltmak amacıyla son yıllarda özellikle başta ABD olmak üzere birçok ülkede yeni yol yüzey işaretleme malzemeleri geliştirilmiş olup bu malzemeler yetkililerce etkin şekilde kullanılmaktadır. Güney Karolayna/Amerika'da yürütülen bir çalışmada ABD, Porto Riko ve Kolombiya'da faaliyet gösteren ulaşım kuruluşlarının yol yüzey işaretleme malzemelerinde etkin olarak kullandıkları malzemeler bir anket çalışması yapılarak belirlenmiştir. 29 farklı şirket üzerinde yapılan bu ankete ait sonuçlar Tablo 4'te verilmiştir [27].

Tablo 4. Yol yüzey işaretleme malzemeleri ve genel kullanımı (Road surface marking materials and general utilization) [28]

İşaretleme Malzemesi	Genel (%)	Şehirler Arası (%)
Su Bazlı Boya	90	38
Çözücü Bazlı Boya	38	3
Bant	66	21
Termoplastik	76	34
Epoxy	55	28
Diğer	10	10

Tablo 5'te ise yol yüzey işaretleme malzemelerinde kullanılan sarı ve beyaz renkli malzemelerin servis ömrü ve maliyetleri karşılaştırılmıştır [6]. Tablodan da görüldüğü üzere su bazlı boyalar kurulum ve maliyet açısından en ucuz olmasına

rağmen servis ömrü en az olan yol yüzey işaretleme tipidir. Dolayısıyla da bu tür boyalar sürekli bakım gerektirmektedir. Tablodan ayrıca sarı ve beyaz renkli yüzey işaretleme için kurulum maliyetlerinin aynı olmasına rağmen bakım maliyetlerinin aynı tür yol yüzey işaretleme için farklı olduğu görülmektedir.

### 3.1. Malzemeler (Materials)

**Su Bazlı Boyalar:** Kaplama yüzey işaretleme olarak en çok kullanılan malzemelerden birisidir. Fiyat olarak diğerlerine göre daha uygundur ve çevre dostudur. Genellikle hareket eden bir kamyon üzerinden yol yüzeyine püskürtülerek uygulanır. Çizgi kalınlığı araç hızına göre değişmektedir. Kalın su bazlı boyalar, cam boncuklar içermektedir ki bunlar ıslak ve geceleyin görsellik için daha etkilidir. Kaplama yüzeyi gibi görev yapmakta olup oldukça kolay aşınmaktadır. Özellikle, yüksek trafik hacminin olduğu yerlerde görselliğinde çok hızlı şekilde azalma görülmektedir. Bu sebepten dolayı bu boyalar geçici olarak ya da trafik yoğunluğunun az olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Kısa servis ömürlerinden dolayı birçok yetkili kurum, düzenli ölçüm ile yenilemek yerine belirli zaman dilimlerinde yeniden uygulama tercihinde bulunmaktadır [27].

**Termoplastik Malzemeler:** Termoplastik boyalar uygun fiyatı ve uzun süre dayanım göstermesi sebebiyle yaygın olarak kullanılan yüzey işaretleme malzemeleridir. Çevre dostudur ve farklı şekillerde uygulanabilirler. Yenilenmesi esnasında eskisini sökmeye gerek yoktur. Asfalt kaplamalarda iyi performans göstermesine rağmen beton yollarda efektif değildir. Beton kaplamalarda çatlama yoluyla aşınma ve geri yansıma özelliğinde kayıp gözlemlenmektedir [27].

**Önceden Şekillendirilmiş Şerit Bantları:** Fabrikada içerisine cam boncuklar entegre edilerek üretilmektedir. Yeni şerit bantları standart işaretleme malzemelerine göre başlangıçta daha fazla geri yansıma özelliğine sahiptir. Fiyatlarından dolayı gerekli yerlerde ve sınırlı şekilde uygulanmaktadır. Bu şeritler genellikle beton yollar ya da trafik hacminin yoğun olduğu yol kesimlerinde kullanılır. Yol yüzeyine iki şekilde uygulanır. Bunlar; gömme ve kaplamadır. Gömme yöntemi yeni yol yüzeyinde uygulanmaktadır. Kaplama yöntemi ise var olan yol yüzeylerine

uygulanmaktadır. Kaplama tipinde şerit bantları bağlayıcı bir malzeme ile yol yüzeyine yapıştırılmaktadır [23]. Bu şeritler genellikle 4 ila 8 yıl arasında bir servis ömrüne sahiptir ve bu süre yol ve çevre koşullarına göre değişiklik gösterebilmektedir [27].

**Epoxy:** Epoxy boyalar hem asfalt hem de beton kaplamalar için iyi bir adezyona sahip dayanıklı malzemelerdir. Bunlar iki farklı malzemenin uygulama esnasında karıştırılmasıyla oluşmaktadır. İlk bileşen reçine, boya maddesi, genişletici ve astar boyadır. İkinci bileşen ise boyanın yerleşme ve kurummasını hızlandıran katalizör maddedir. Cam boncuklar bazen ilk bileşen olarak hazırlanır ve boya henüz kurumamışken üzerine uygulanır. Epoxy boyalar maliyeti yüksek ve 2 ila 4 yıl arasında servis ömrüne sahiptir. Bu boyalar zaman içerisinde yaşlandıkça ve yoğun ultraviyole ışınlarına maruz kaldıkça rengini kaybetmektedirler. Yetkililer bu

boya türünü daha çok beton yollarda, dayanım ve maliyetinden dolayı trafik akımının yüksek olduğu yol yüzeylerinde kullanılmaktadırlar. Bu boyalar özel ekipmanlar kullanılarak hareket eden bir kamyon üzerinde belirli bir sıcaklıkta karıştırılarak yol yüzeyine püskürtme ile uygulanmaktadırlar [27].

**Diğer Malzemeler (Methyl Methacrylate, Polyurea):** Methyl methacrylate diğer dayanıklı yol yüzey işaretleme malzemelerinden birisidir. Kullanım alanı oldukça sınırlıdır. Uygulanması diğerlerine göre oldukça kolaydır. Beton ve asfalt kaplamaya kolaylıkla bağlanmaktadır. Polyurea ise yeni, yüksek dayanıma sahip, beton ve asfalt kaplamaya kolaylıkla yapışabilen bir kaplama boyama türüdür. Uygulanması diğerlerine göre özel ekipmanlar gerektirdiği ve yüksek maliyete sahip olduğu için henüz kullanımı çok yaygın değildir [27].

Tablo 5. Yol yüzey işaretlemelerinin maliyeti ve ömrü (Cost and service life of road surface markings) [6]

Malzemenin Türü	Yol İşaretlemeleri Kurulum Maliyeti (TL/Metre)		Yol İşaretlemeleri Hizmet Ömrü (Ay)		Yol İşaretlemeleri Bakım Maliyeti (TL/Metre/Yıl)	
	Tipik	Aralık	Tipik	Aralık	Tipik	Aralık
<b>Beyaz Renk</b>						
Su bazlı boya	0,7	0,2-2,4	10,4	3,1-17,7	0,9	0,1-9,3
Epoxy	3,1	1,0-7,9	23,0	5,9-40,1	1,7	0,2-16,2
Methyl Methacrylate	14,9	8,5-18,6	14,4	6,8-22,0	12,4	4,6-32,9
Methyl Methacrylate-Desenli	17,6	13,7-21,4	21,0	7,6-34,3	10,0	4,8-33,7
Polyester	1,6	0,6-3,7	24,7	16,9-32,6	0,7	0,2-2,56
Desenli bant	28,4	18,3-37,8	27,4	13,8-41,0	12,4	5,4-32,9
Termoplastik	3,9	1,0-10,4	26,2	12,1-40,3	1,7	0,2-10,2
Termoplastik-Desenli	10,6	4,3-15,9	23,8	11,1-36,6	5,4	1,3-17,2
<b>Sarı Renk</b>						
Epoxy	3,2	1,0-7,9	34,3	19,8-48,9	1,1	0,2-4,8
Methyl Methacrylate	14,9	8,5-18,7	16,8	12,6-21,0	10,6	4,9-17,8
Methyl Methacrylate-Desenli	17,6	13,7-21,4	25,0	19,1-31,0	8,4	5,2-13,4
Polyester	1,6	0,6-3,7	43,8	38,0-49,6	0,5	0,1-1,09
Desenli Bant	28,4	18,3-37,8	30,6	18,7-42,5	11,1	5,1-24,3
Termoplastik	3,9	1,0-10,4	27,5	15,4-39,5	1,7	0,2-8,1
Termoplastik- Desenli	10,6	4,3-15,9	26,7	16,4-37,0	4,8	1,3-11,6

Not: 1 feet 0,30 metredir.

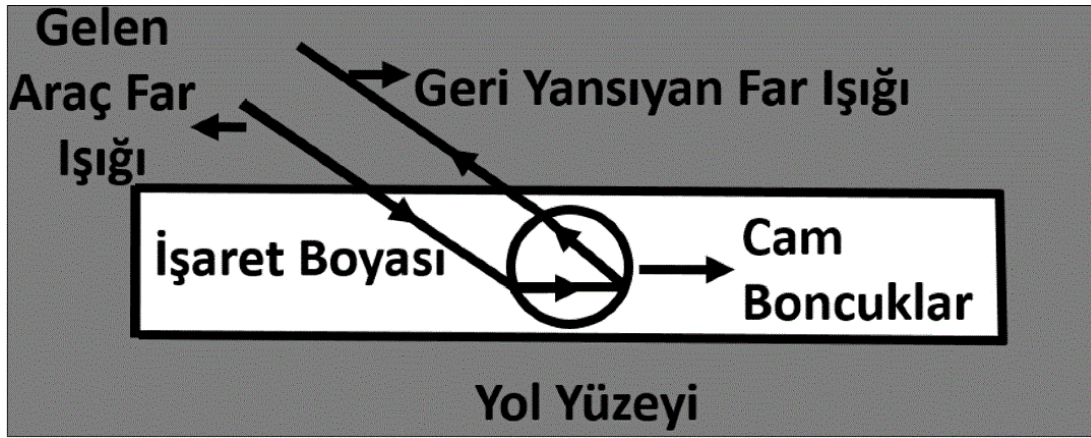
#### 4. YOL YÜZEY İŞARETLEME MALZEMELERİNİN GÖRÜNÜRLÜĞÜNÜN ÖLÇÜLMESİ (MEASUREMENT OF VISIBILITY OF ROAD SURFACE MARKINGS MATERIALS)

##### 4.1. Geri Yansımaya (Retroreflectivity)

Geri yansımaya üzerine herhangi bir yerden gelen ışık yardımıyla malzemelerin parlamasıdır (Şekil 1). Geri yansımaya parlaklığı katsayısı (RL) kaplama yüzeylerindeki işaretlemelerin geri yansımalarını tanımlamak için en çok kullanılan ölçüm yöntemidir. Geri yansımaya ayrıca yüzeye gönderilen aydınlatma miktarına karşılık yüzey tarafından yansıtılan parlaklığın ölçüldüğü bir performans testidir ve parlaklık katsayısı tipik olarak mcd/m<sup>2</sup>/lux (milikandela/metrekare/lux)

birimi ile ifade edilir. Yol yüzey işaretlemelerinin kalitesi retroreflektometre denilen cihazlar ya da görsel değerlendirme yöntemleri kullanılarak ölçülmekte ve bu ölçümler yansıyan ışığın yoğunluğunu göstermektedir. Trafik işaretlemelerinin parlaklıklarının seviyesi yol yüzey kaplamasının cinsine, gelen ışığın özelliğine, giriş ve gözlem açılarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Giriş açısı ( $\beta$ ) ve gözlem açısının ( $\alpha$ ) detaylı gösterimi Şekil 2’de verilen biçimdedir.

Geri yansımaya ölçüm cihazları bir malzemenin üzerine gelen ışığın ne kadarını yansıttığıyla ilişkilendirilir. Örneğin Şekil 1, yol yüzeyinde bulunan cam boncuklu bir yüzey işaretlemesinin üzerine gelen ışığı nasıl geri yansıttığını göstermektedir. Geri yansımaya ölçümü iki hususa göre yapılmaktadır. Bunlar: kontrastlık oranı ve ölçüm geometrisidir.



Şekil 1. Yol yüzey işaretlemelerinin geri yansımaya (Retroreflectivity of road surface markings)

**Kontrast oranı:** Yol yüzey işaretlemeleri ve yol kaplaması arasındaki kontrast oranı, işaretlemelerin görünürlüğü için oldukça önemlidir. Gündüz kontrastlığı, kaplama ve yüzey işareti arasındaki renk kontrastıdır. Gece kontrastlık oranı (CR) yüzey işaretlemelerinin geri yansımaya ile onun etrafındaki yol yüzeyi arasında eşitlik 1’de verilen ilişkidir [28].

$$CR = \frac{R_L - R_L(\text{Kaplama Yüzeyi})}{R_L(\text{Kaplama Yüzeyi})} \quad (1)$$

Burada:

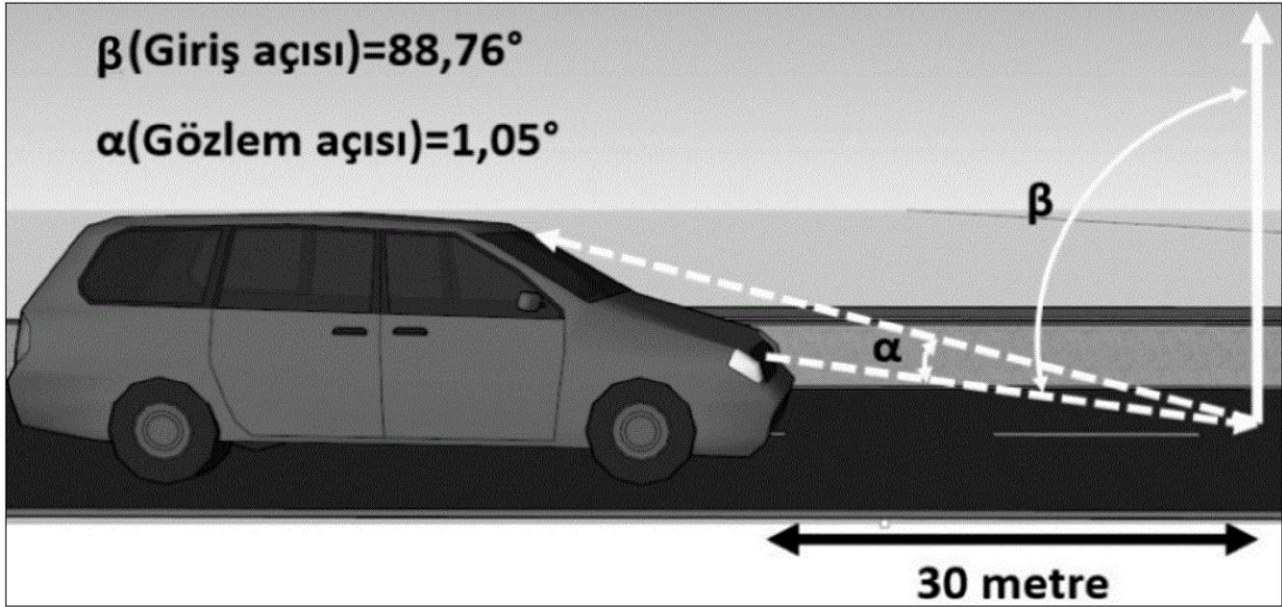
$CR$  : Gece kontrastlık oranı,

$R_L(\text{işaretleme})$  : İşaretleme geriyansımaya,

$R_L(\text{Kaplama Yüzeyi})$ : Kaplama yüzeyinin geriyansımaya.

**Ölçüm geometrisi:** Geri yansımaya ölçümde kullanılan geometri 30 metre geometrisidir. Şekil 2’den de görüleceği üzere 30 metre geometrisi 1,05 derecelik bir gözlem ve 88,76 derecelik bir giriş açısına ( $\beta$ ) sahiptir (Eş giriş açısı 1,24 derecedir). Avrupa Standart Hazırlama Komitesi (CEN), başlangıç olarak 30 metre geometri standardını hazırlamıştır ve bu değer ASTM E1710 [22] içinde de tanımlanmaktadır. Bu ölçüm standardı yol yüzey işaretlemeleri için minimum geriyansımaya değerinin belirlenmesi açısından oldukça önemlidir [27].

Yol yüzey işaretlemelerinin görünürlüğüne ve geriyansımaya etki eden ve zaman içerisinde azalmasına sebep olan birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler Tablo 6’da verilen şekilde özetlenebilmektedir.



Şekil 2. Retroreflektivite ölçümlerinde kullanılan standart 30 metre geometrisi (Standard 30 m geometry used in retroreflectivity measurements)

Tablo 6. İşaretlemelerin performansına etki eden ve azalmasına sebep olan parametreler (Effective parameters on performance of road surface markings) [23]

Görünürlüğüne ve Geri yansımaya Etki Eden Parametreler	Geri yansımının Zaman İçerisinde Azalmasına Sebep Olan Parametreler
Boya malzemesi içerisinde yer alan boncukların sayısı	Cam boncukların, üzerindeki trafik yükü sebebiyle zaman içerisinde yerinden oynaması
Boncukların bileşeni	Oksidasyon ve ultraviyole güneş ışıkları sebebiyle binder tabakasının gradasyonu ve boncukların kaybolması
Boncukların yüzey koşulları ve boncukların boyutları	Renk pigmentlerinin solması sebebiyle yüzey işaretlemelerindeki değişim
Kullanılan binder malzemesi	Binder tabakasının gevşek olması sebebiyle cam boncukların kaplama yüzeyinden ayrılması
Yol kaplaması	Kar küreme ya da kazıma sebebiyle cam boncukların binder tabakasından ayrılması,
Hava koşulları	Kirli ya da ıslak bir yüzeyin boyanarak işaretlemenin yapılması

#### 4.2. Geri Yansımaya Ölçüm Teknikleri (Measurement methods of retroreflectivity)

**Görsel Değerlendirme:** Yol yüzeyi işaretlemelerinin geri yansımalarını ölçmek amacıyla literatürde en çok kullanılan yöntemlerin başında gelmektedir. Herhangi bir ölçüm cihazının (el ya da mobil retroreflektometre) bulunmadığı durumlarda etkin şekilde kullanılmaktadır (Şekil

3). Bu yöntemde işaretlemelerin geri yansımaya özelliğinin kalitesi gündüz ve gece için gözlemci ya da gözlemcilerin görsel değerlendirmeleri ile belirlenmektedir. İnsandan kaynaklı hata olabileceğinden dolayı sonuçlarına güvenilen bir ölçüm tekniği değildir. Basit ve hızlı olması, düşük bir maliyet gerektirmesi, herhangi bir ekipman gerektirmemesi, ölçümün kolay olması ve trafik üzerinde çok bir etkisinin bulunmaması nedeniyle birçok avantaja sahiptir [27].



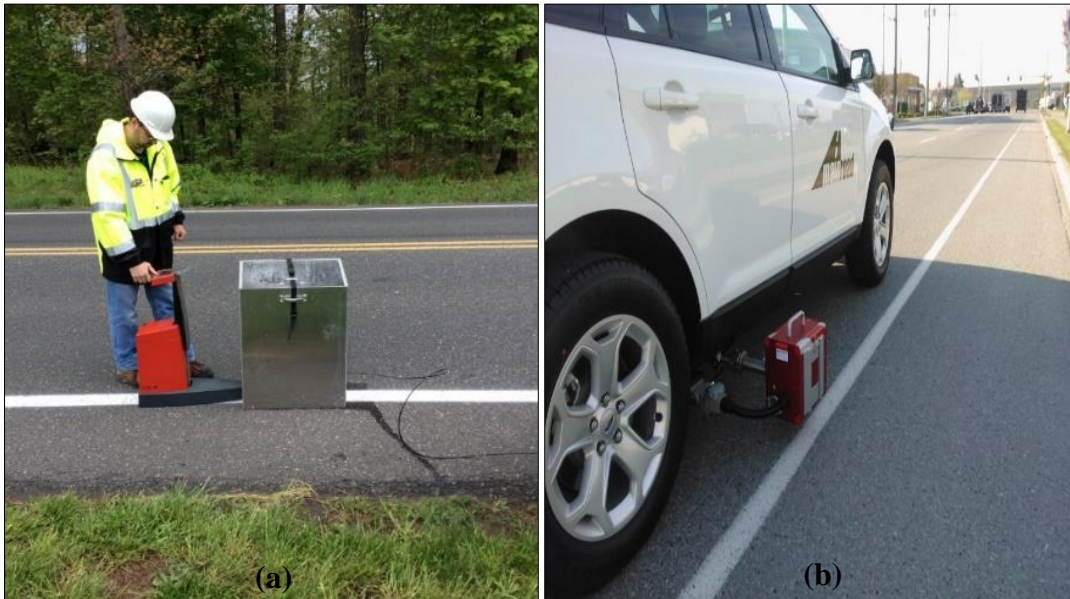
Şekil 3. Yol yüzey geri yansımalarının görsel olarak ölçümü (Visual measurements of road surface retroreflectivity [29])

**El Retroreflektometreleri:** El ile bir çizgi üzerine yerleştirilerek ve bir çizgi boyunca hareket ettirilerek okumaların gerçekleştirilmesi ile yapılan ölçüm yöntemidir (Şekil 4a). Ölçümler normalde tek kişi ile yapılabilir fakat şerit kapama ya da gelen araç olup olmaması durumunu gözleyebilmek amacıyla ilave görevli gerekebilmektedir. El retroreflektometrelerinin avantajları ve dezavantajları Tablo 7’de verilen şekilde özetlenebilmektedir [27].

**Mobil Retroreflektometreler:** Yol yüzey işaretlemelerinin performansını sayısal olarak ölçmede kullanılan diğer bir yöntemdir. Araç üzerine yerleştirilen ölçüm cihazı ve ona bağlı bir bilgisayar yardımıyla ölçümler yapılmaktadır (Şekil 4b). El retroreflektometrelerine göre dört

kat daha pahalı cihazlar olup daha fazla eğitim ve bakım gerektirmektedir. Özellikle kaliteli veri toplamak için yeterli eğitim oldukça önemlidir. Bu cihazların avantajları ve dezavantajları Tablo 7’de verilen şekilde özetlenebilmektedir [27].

Yapılan araştırmalardan el ve mobil retroreflektometrelerin ölçümleri ile görsel bazlı yazılımlar arasında kesin bir ilişki olmadığı gözlemlenmiştir. El ve mobil cihazların her ikisi de 30 metre geometrisinin ölçeklendirilmiş versiyonunu kullanmaktadır. Mobil cihazlarda 10 metre ve el cihazlarında 1’er metre aralıklarla ölçüm yapılmaktadır [30]. Fakat bu ölçeklendirmeden kaynaklı olarak gerekli açılar yeterli olmadığından şikâyet edilmektedir.



Şekil 4. (a) El [31] ve (b) Mobil [32] retroreflektometre cihazları ile şerit çizgi kalitesinin belirlenmesi (Measurement of line quality by using hand and mobile retroreflectometer devices)

Tablo 7. El retroreflektometre cihazının avantajları ve dezavantajları (Advantages and disadvantages of hand retroreflectometer device [27])

Cihaz Türü	Avantajlar	Dezavantajlar
El	Basit şekilde kalibre edilebilir.	Özellikle çok şeritli yollarda şerit kapama gerektirebilir.
	Küçük bir eğitim ile ölçüm öğrenilebilir	Ölçüm yapan kişi trafik akımına maruz kalırsa güvenli olmayan durumlar gözlenebilir.
	Güvenli şekilde veri toplanabilir. Mobil olanlar ile kıyaslandığında daha doğru sonuçlar vermektedir.	Toplanan veri sayısı oldukça azdır.
	Mobil retroreflektometrelere göre daha ucuz ve daha kolay bakım yapılabilir. Dış faktörlerden daha az etkilenmektedir	Uzun yüzey işaretlemelerinin performansını ölçmek çok zaman almakta ve oldukça maliyetlidir.
	Küçük yüzey işaretlemeleri için oldukça kolaydır.	Yavaş olarak ölçüm yapmakta ve oldukça maliyetlidir
Mobil	El reflektometrelerine göre daha fazla ve kaliteli veri toplanabilmektedir.	Doğru şekilde kalibre edilmediği ve gerekli ölçüm kurallarına uyulmadığı takdirde oldukça hatalı sonuçlar vermektedir.
	Şerit kapama gerektirmez	Aracı kullanan ve yazılımı kullanan kişi olmak üzere 2 kişi ile gerçekleştirilebilmektedir.

### 4.3. Yapılmış Çalışmalar ve Elde Edilen Bulgular (Conducted studies and obtained findings)

Yol yüzey işaretlemelerinin servis ömrü genellikle bu yüzey işaretlemelerinin geri yansımaya özelliğinin belirli bir eşik değerin altına düştüğü durum olarak tanımlanmaktadır. Literatürde farklı yol yüzeyi ve hava koşullarına göre malzemelerin,

sürücüler için yeterli görüş mesafesi sağlayan minimum eşik değerleri, en iyi geri yansımaya değerleri ve servis ömürlerini belirlemek amacıyla yapılmış birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Turner [33] yaptığı çalışma sonucu elde edilen bulgulardan, yol yüzey işaretlemeleri için gerekli olan minimum geri yansımaya değerlerini çeşitli yol sınıfları için Tablo 8’de verilen şekilde önermiştir [33].

Tablo 8. Yol yüzey işaretlemeleri için önerilen minimum geri yansımaya ( $R_L$ ) değerleri [33]

Seçenek (1)	Otoyol Olmayan ( $\leq 64,4$ km/sa)	Otoyol Olmayan ( $\geq 64,4$ km/sa)	Otoyol ( $\geq 88,5$ km/sa)
Seçenek (2)	$\leq 64,4$ km/sa)	$\geq 72,5$ km/sa)	$\geq 96,6$ km/sa ve $> 10000$ OGT)
Seçenek (3)	$\leq 64,4$ km/sa)	$(72,5-88,5$ km/sa)	$\geq 96,6$ km/sa)
RRPM’li	Beyaz Renk	30 (mcd/m <sup>2</sup> /lux) [34]	35 (mcd/m <sup>2</sup> /lux) [34]
	Sarı Renk	30 (mcd/m <sup>2</sup> /lux) [34]	3 (mcd/m <sup>2</sup> /lux) [34]
RRPM’siz	Beyaz Renk	30 (mcd/m <sup>2</sup> /lux) [34]	100 (mcd/m <sup>2</sup> /lux) Etkiyi azaltmak için birçok sürücü bu değeri seçmiştir.
	Sarı Renk	55 (mcd/m <sup>2</sup> /lux)	65 (mcd/m <sup>2</sup> /lux)
			150 (mcd/m <sup>2</sup> /lux) Düşük hız ile gerekli algı süresini sağlamak için bu değer belirlenmiştir.
			100 (mcd/m <sup>2</sup> /lux)

RRPM: Yükseltilmiş kaplama işareti

Bir diğer çalışma kapsamında Zwahlen ve Schnell [34]’in araç hızlarına göre minimum retroreflektivite değerlerini araştırdıkları çalışma sonucunda elde edilen bulgular Tablo 9’da

verilmiştir. Hawkins vd. [35] ise minimum bu geri yansımaya değerlerini hız aralıklarına ve yol sınıflarına göre Tablo 10’da verilen şekilde önermiştir.

Tablo 9. Zwahlen ve Schnell [34]’in önerdiği minimum  $R_L$  değerleri [34]

Araç Hızı (km/sa)	Minimum gerekli $R_L$ değerleri (mcd/m <sup>2</sup> /lux)	
	RRPM olmadan 3,7 saniye algı süresi	RRPM olan 2 saniye algı süresi
0-40,3	30	30
40,3-58,0	50	30
58,0-74,1	85	30
74,1-90,2	170	35
90,2-106,3	340	50
106,3-120,8	620	70

RRPM: Yükseltilmiş kaplama işareti.



Tablo 10. Hız aralıklarına göre minimum R<sub>L</sub> değerleri [35]

İşaret Rengi	Hız Aralıklarına Göre Minimum R <sub>L</sub> Değerleri (mcd/m <sup>2</sup> /lux)			Yol Sınıflarına Göre Minimum R <sub>L</sub> Değerleri (mcd/m <sup>2</sup> /lux)		
	≤64,4 km/sa	56,4-80,5 km/sa	≥72,5 km/sa	Yerel ve küçük toplayıcılar	Büyük toplayıcılar ve arterler	Otoyollar, Çevreyolları ve diğer tüm yollar ≥88,5 km/sa
Beyaz	Var	80	100	Var	80	100
Sarı	Var	65	80	Var	65	80

Bir başka çalışmada ise Debaillon vd. [25] hedefin görseelliğini tahmin eden (TARVIP) senaryoları ile kaplama tipine (Tablo 11) ve TARVIP senaryoları ile algı süresine (Tablo 12) göre minimum geri yansımaya değerlerinin belirlemiştir.

Loetterle vd. [36] 2000 yılında Minnesota'da geri yansımaya sınıflandırmak amacıyla yürüttüğü çalışmada, sürücülerin geri yansımaya değerleri önceden ölçülmüş bir yolda gece ve kuru hava koşullarında sürüş testi yaparak, kenar ve yol eksen çizgilerinin kalitesini değerlendirmiştir.. Bu çalışmada sürücüler, her iki yöndeki her bir işaretin geri yansımaya ve çizgi tipini 1'den 5'e kadar değerlendirmişlerdir (1=Çok Kötü; 2=Kötü; 3=İyi; 4= Çok İyi; 5=Harika). Sürücülerin

verdikleri puanlara göre bu yol için geri yansımaya değeri yaklaşık olarak 200 mcd/m<sup>2</sup>/lux olarak ölçülmüştür. Debaillon vd. [25] ise çalışmasında yükseltilmiş ve tamamen işaretsiz yol yüzeyleri için minimum geri yansımaya değerini 40 mcd/m<sup>2</sup>/lux olarak belirlemiştir.

Farklı malzeme karakteristiklerine, kaplama türlerine, hava koşullarına göre geri yansımaya için bir eşik değeri belirlemek amacıyla yukarıda bahsedildiği gibi son yıllarda birçok çalışma yapılmasına rağmen kesin bir eşik değeri ne yazık ki belirlenememiştir. Yine de yapılan araştırmalara göre en uygun eşik değerlerin beyaz çizgiler için 150 mcd/m<sup>2</sup>/lux ve sarı çizgiler için 100 mcd/m<sup>2</sup>/lux olduğu önerilmektedir [7].

Tablo 11. Kaplama tipine ve TARVIP senaryolarına göre elde edilen minimum R<sub>L</sub> değerleri (mcd/m<sup>2</sup>/lux) [25]

RRPM Senaryosu	İşaretleme Türü	Kaplama Tipi	Araç Hızı (km/sa)	Araç Tipi	
				Otomobil	Kamyon/Tır
Yok (2,20 s süresi)	YCL-WEL (Sarı EksenÇizgisi-Beyaz Kenar Çizgisi)	Asfalt	64,4	32	37
			88,5	52	56
			112,7	92	86
		Beton	64,4	26	30
			88,5	47	47
			112,7	88	79
	WEL (Beyaz Kenar Çizgisi)	Asfalt	64,4	88	86
			88,5	223	188
			112,7	492	379
		Beton	64,4	81	77
			88,5	215	176
			112,7	491	363
	YCL (Sarı Eksen Çizgisi)	Asfalt	64,4	94	83
			88,5	249	189
			112,7	577	391
		Beton	64,4	87	75
			88,5	241	176
			112,7	575	374

Tablo 12. Farklı algı (sürücünün çizgileri fark etme) sürelerine ve TARVIP senaryolarına göre gerekli minimum R<sub>L</sub> değerleri (mcd/m<sup>2</sup>/lux) [25]

Algı Süresi (Saniye)	Hız (km/sa)		
	64,4	88,5	112,7
1,5	25	30	40
2,0	29	43	72
2,5	37	69	135
3,0	51	112	248
3,5	72	184	441
4,0	102	294	735

## 5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ (EVALUATION AND RESULT)

Yol yüzey işaretlemeleri, yol kenar işaretlemeleri ile birlikte sürücülerin özellikle gece vaktinde güvenli şekilde araç kullanmalarını sağlayan en önemli görsellerden birisidir. Yapılan literatür taramasından da görüldüğü üzere bu işaretlemelerin, uzun mesafeli geri yansımaya özelliğine ve daha uzun dayanıma sahip olması için birçok çalışma yürütülmüş ve halen de yürütülmeye devam etmektedir. Yapılan araştırmalardan da açıkça görüldüğü üzere yüzey işaretleme yapılacak yoldaki araç hızına, sürücülerin algı (intikal reaksiyon) süresine, kaplamanın türüne ve yolun sınıfına göre farklı özelliklerde malzemeler geliştirilmektedir. Çalışmalar detaylı olarak incelendiğinde buradaki ana amacın, yüzey işaretleme yapılacak yolun karakteristiklerine göre en ekonomik, en uzun dayanıma sahip olan ve en efektif yüzey işaretleme tipinin geliştirilmesi olduğu görülebilmektedir. Çalışmalardan ayrıca, ülkemizde olduğu gibi çoğunlukla soğuk boya olarak bilinen boya tipinin yerine, yolun karakteristiklerine göre farklı özelliklere sahip boya ya da kaplama malzemelerini kullanmanın en doğru karar olduğu belirlenmiştir. Retroreflektivite ile kaza sayıları arasındaki ilişkiyi inceleyen birçok çalışma yol yüzey işaretlemelerinde yeterli geri yansımaya özelliği olmasının kaza sayılarını geceleyin, kuru ya da ıslak koşullarda azalttığını göstermiştir. Bu çalışmalara göre ayrıca yola bakım yapılmasının, yol yüzey ve kenar işaretlemelerinin olmasının ve yol yüzeyinin aydınlatılmasının birlikte uygulanmasının gece kazalarını %50 ve gece yapılan hataları ise %28 oranında azalttığı saptanmıştır [6, 26]. Birçok farklı çalışmadan elde edilen bu sonuçlar, özellikle yüzey işaretlemelerinin geri yansımaya özelliğinin sürekli yüksek tutulmasının ne kadar gerekli ve ne kadar hayati bir önem sahip olduğunu göstermektedir.



Dolayısıyla ülkemizde bu tür malzemelerin kullanımının yaygınlaşması, trafik kazalarını önleyerek can ve mal kayıplarının azalmasına doğrudan ve pozitif bir katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Trafik Kaza İstatistikleri, Ankara, 2015.
- [2] M. M. Aydın, A. Topal ve S. Tanyel, “Çok şeritli yollarda yol yüzey bozukluklarının sürücü davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi”, *TMMOB 10: Ulaştırma Kongresi, Bildiri Kitapçığı*, Sayfa 413–425. İzmir, Türkiye, Eylül 2013.
- [3] M. M. Aydın ve A. Topal, “Effect of road surface deformations on lateral lane utilization and longitudinal driving behaviours”, *Transport*, cilt 31 no. 2, pp.192-201, 2016.
- [4] P. Hatzi, “Retroreflectivity: Raising the nighttime brightness of traffic signs and markings”. 2015 FHWA/Safety HAS-1. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.Safety.fhwa.dot.gov/fourthlevel/pdf/overview.pdf>. [Erişim: 20 Ekim 2016].
- [5] Minnesota Department of Transportation (MDoT) “Minnesota statewide highway systems operation plan 2005”. [Çevrimiçi]. Available: <http://www.dot.state.mn.us/maintenance/docs/HSOP%20Final%20Report%208-17-05.pdf>. [Erişim:20 Ekim 2016].
- [6] J. Migletz, ve J. Graham, “Long-term pavement-marking practices (NCHRP Synthesis of Highway Practice No. 306)”, Washington, DC: *National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board*, 2002.

- [7] A. R. Abbas, P. Sarker ve A. Frankhouser, "Performance evaluation of wet pavement markings in Ohio". *Public Works Management & Policy*, cilt 19 no.2, pp. 180-197, 2014.
- [8] A. M. Pike, H. G. Hawkins ve P. J. Carlson, "Evaluating the retro-reflectivity of pavement-marking materials under continuous wetting conditions", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, cilt 2015, pp. 81-90, 2007.
- [9] T. Schnell, F. Aktan ve Y. C. Lee, "Nighttime visibility and retro-reflectance of pavement markings in dry, wet, and rainy conditions", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, cilt 1824, pp. 144-155, 2003.
- [10] F. Aktan ve T. Schnell, "Performance evaluation of pavement markings under dry, wet, and rainy conditions in the field", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, cilt 1877, pp. 38-49, 2004.
- [11] P. J. Carlson, J. D. Miles, M. P. Pratt ve A. M. Pike, "Evaluation of wet-weather pavement markings: First year report (Report No. 0-5008-1)". College Station: Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 2005.
- [12] P. J. Carlson, J. D. Miles, A. M. Pike ve E. S. Park, "Evaluation of wet-weather and contrast pavement-marking applications: Final report (Report No. 0-5008-2)". College Station: Texas Transportation Institute, Texas A&M University, 2007
- [13] B. R. Gibbons, C. Andersen ve J. Hankey, "Wet night visibility of pavement markings: A static experiment", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, cilt 1911, pp. 113-122, 2005.
- [14] W. N. Craig, W. E. Sitzabee, W. J. Rasdorf ve J. E. Hummer, "Statistical validation of the effect of lateral line location on pavement-marking retro-reflectivity degradation", *Public Works Management & Policy*, cilt 12, pp. 431-450, 2007.
- [15] B. R. Gibbons ve J. Hankey, "Wet night visibility of pavement markings: Dynamic experiment", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, cilt 2015, pp. 73-80, 2007.
- [16] L. Higgins, J. D. Miles, D. Burns, F. Aktan, M. Zender ve J. M. Kacsmarczik, "Nighttime visibility of prototype work-zone markings under dry, wet-recovery, and rain conditions". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, cilt 2107, pp. 69-75, 2009.
- [17] J. K. Lindly ve A. Narci, "Evaluation of double-drop beads pavement edge line (UTCA Report Number 05409)" Tuscaloosa: University Transportation Center for Alabama, 2009.
- [18] L. Sasidharan, V. Karwa ve E. T. Donnell, "Use of pavement-marking degradation models to develop a pavement-marking management system", *Public Works Management & Policy*, cilt 14, pp. 148-173, 2009.
- [19] J. Robertson, W. Sarasua, J. Johnson ve W. Davis, "A methodology for estimating and comparing the lifecycles of high-build and conventional waterborne pavement markings on primary and secondary roads in South Carolina", *Public Works Management & Policy*. Advance online publication, 2012.
- [20] H. Fu ve C. G. Wilmot, "Evaluating alternative pavement marking materials", *Public Works Management & Policy*, cilt 18, 279-297, 2013.
- [21] W. E. Sitzabee, E. D. White ve A. W. Downing, "Degradation modeling of polyurea pavement markings", *Public Works Management & Policy*, cilt 18, pp. 185-199, 2013.
- [22] ASTM International. "Standard Test Method for Measurement of Retroreflective Pavement Marking Materials with CEN-Prescribed Geometry Using a Portable Retroreflectometer", Designation E1710-05. West Conshohocken, PA, 2005.
- [23] Texas Department of Transportation (TxDOT). Pavement Marking Handbook, August 2004.
- [24] He, Y., T. Schnell, P.J. Carlson ve C. D. Debaillon. Updates to Research on Recommended Minimum Levels to Pavement marking Retroreflectivity to Meet Driver Night Visibility Needs. Technical Memorandum No. 1. Prepared for Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, Washington, D.C., September 2006.
- [25] C. Debaillon, P. J. Carlson, Y. He, T. Schnell ve F. Aktan, "Updates to research on recommended minimum levels for pavement marking retroreflectivity to meet driver night

- visibility needs (No. FHWA-HRT-07-059)", 2007.
- [26] K. Shahata, H. Fares, T. Zayed, M. Abdelrahman ve F. Chughtai, "Condition rating models for sustain- able pavement marking". *Transportation Research Board 2008 annual meeting. January 2008*, US. Washington DC: Transportation Research Board, Paper #08-0018, 2008.
- [27] R. J. Benz, A. M. Pike, S. P. Kuchangi ve Q. Brackett, "Serviceable pavement marking retroreflectivity levels: Technical report (No. FHWA/TX-09/0-5656-1)". Texas Transportation Institute, Texas A & M University System, 2009.
- [28] W. A. Sarasua, D. B. Clarke ve W. J. Davis, "Evaluation of Interstate Pavement Marking Retroreflectivity", Clemson University, Report number FHWA-SC-03-01, April 2003.
- [29] Worldhighways, 2003 "Reflective road markings". Available from: [Çevrimiçi]. Available: <http://www.worldhighways.com/categories/road-markings-barriers-workzone-protection/features/reflective-road-markings-improve-visibility-safety/> [Erişim: 20 Ekim 2016].
- [30] C. Holzschuher ve T. Simmons, "Mobile Retroreflectivity Characteristics for Pavement Markings at Highway Speeds", Research Report FL/DOT/SMO/05-486. Florida Department of Transportation, May, 2005.
- [31] Guidemark, Inc. 2016. "Retro-Reflectivity Testing", [Çevrimiçi]. Available: <http://guidemarkinc.com/retro-reflectivity-testing/> [Erişim: 20 Ekim 2016].
- [32] Mainroad 2016. "Mobile retroreflectometers". [Çevrimiçi]. Available: [http://mainroad.ca/wp-content/uploads/2014/05/WP\\_002424.jpg](http://mainroad.ca/wp-content/uploads/2014/05/WP_002424.jpg) [Erişim: 20 Ekim 2016].
- [33] J. D. Turner, "Pavement marking Retroreflectivity: Research Overview and Recommendations". Unpublished report, FHWA, Office of Safety and Traffic Operations Research and Development. 1999.
- [34] H. T. Zwahlen ve T. Schnell, "Pavement marking Visibility Research and Proposed Values for Minimum Required Pavement marking Retro Reflectivity". Unpublished report, Department of Industrial and Systems Engineering, Ohio University Athens, Ohio. August, 1998.
- [35] H. G. Hawkins, G. Schertz, J. Carlson ve R. Beck. "Minimum Levels of In-Service Retroreflectivity for Pavement markings: Summary of Workshop Findings". Federal Highway Administration, August 2000, unpublished report.
- [36] F. Loetterle, R. Beck ve J. Carlson, "Public perception of pavement marking brightness", *Transportation Research Record* cilt 1715, pp. 51–59, 2000.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 20.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 29.03.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.298889	

## SKK ve SKNK yöntemlerinde kullanılan parametrelerin bakır ve pirinç malzemelerin birleştirme özelliklerine olan etkilerinin incelenmesi

Zafer Barlas\*<sup>1</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada, literatürde verilen bakır ve pirinç malzemelerin aynı veya farklı bir türdeki metale, sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ve sürtünme karıştırma nokta kaynağıyla (SKNK) yapılan birleştirme çalışmaları üzerine bir derleme gerçekleştirilmiştir. Özellikle takım geometrisi, takım dönme ve ilerleme hızı gibi önemli kaynak değişkenlerinin, bu iki yöntemdeki birleştirme performanslarına, kaynak bölgesinin mikroyapı değişimine, kaynak hataları oluşumuna ve farklı metallerin birleştirilmesinde kaynak kalitesini etkileyen metaller arası fazların mevcudiyetine olan etkileri özetlenmiştir. İncelenen çalışmalar arasında saf bakırın yine saf bakıra, pirinç alaşımının yine aynı alaşıma, saf bakırın pirinç alaşımlarına, saf bakır veya pirinç alaşımlarının saf alüminyum veya çeşitli alüminyum alaşımlarına, pirinç alaşımının çelik malzemeye olan birleştirmeleriyle ilgili elde edilen sonuçlar yer almaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** bakır, pirinç, alüminyum, SKK, SKNK

### A review on effect of process parameters on weld features of copper and brass material in FSW and FSSW methods

### ABSTRACT

In this study, a literature survey has been done about similar and dissimilar copper and brass alloys joints by friction stir welding and friction stir spot welding methods. The effects of some important process parameters such as tool geometry, rotation speed and travel speed of tool on joint performances, change in weld microstructure, defect formation and occurrence of intermetallic compounds, which are adversely affect weld quality in dissimilar joint, have been summarized. The results of studies about joining of copper to copper, brass to brass, copper to brass, copper to aluminum or alloy, brass to aluminum or alloy, brass to steel have been reviewed in the present work.

**Keywords:** copper, brass, aluminum, FSW, FSSW

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, Serdivan-Sakarya - barlas@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bakır, kolaylıkla şekil verilebilirliği ve iyi korozyon direnciyle bir arada sahip olduğu mükemmel elektrik ve ısı iletkenlik özellikleri sayesinde, endüstriyel uygulamalar için en önemli mühendislik malzemeleri arasında yer almaktadır. Alaşımlandırmayla iyi mukavemet ve sünekliğin yanı sıra dekoratif ve çekici görünümü diğer önemli özellikleri arasındadır. Pirinç, bakırın, içerisinde %5'den %45'e kadar geniş bir aralıkta çözünebilirliğe sahip olan çinkoyla yaptığı alaşımdır ki çoğunlukla ticari pirinç alaşımları, beklenen özelliklerin sağlanması için düşük miktarlarda Al, Mn, Ni, Pb, Si, Sn gibi diğer elementleri de içermektedir. Tek fazlı pirinç, bakırdan daha iyi soğuk şekillendirilebilirlik, yüksek mukavemet ve süneklikle beraber, daha düşük elektrik ve ısı iletkenliğe sahiptir [1, 2]. Bakır bu üstün özelliklerine karşın, geleneksel ergitme tekniklerinde yüksek ısı iletkenliği sebebiyle nispeten daha yüksek ısı girdisi gerektirmekte ve bunun sonucunda da ergime bölgesinde kaydadeğer biçimde tane irileşmesine, geniş bir ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) oluşumuna ve yüksek kalıntı gerilmelerle birlikte çarpılmalara uğramaktadır [3]. Pirinç malzemelerin ergitme kaynaklarında ise renk değişimi, yüksek sıcaklıkta oksitlenme, nispeten yüksek ısı iletkenliğine bağlı olarak nüfuziyetsizlik, çinkonun düşük sıcaklıkta buharlaşması nedeniyle mekanik özelliklerin düşmesi ile çarpılma gibi bazı zorluklarla karşılaşmaktadır [4].

Sürtünme karıştırma kaynağı (SKK) ile bunun bir türevi olan sürtünme karıştırma nokta kaynağı (SKNK) yöntemleri iş-parçalarında ergime olmaksızın katı fazda birleştirmeye olanak sağlamaktadır. Böylece kaynakla birleştirilecek malzemelerde ergime ve katılaşmayla ortaya çıkabilen bazı problemlerle bu yöntemde karşılaşılmamaktadır. Her iki yöntemde de özel olarak tasarlanmış bir takım kullanılmaktadır. Kendi eksenini etrafında belirli bir hızda dönen ve iki farklı çapa sahip kısımdan oluşan takım, levha yüzeylerinden içeri girerek malzeme yüzeylerine sürtünür. Sürtünme sonucu sıcaklığın artmasıyla, birleştirme için gerekli ısı girdisi açığa çıkarken, aynı zamanda birleştirilecek malzemelerin karışımı da sağlanır. SKK ile alın ve bindirme formundaki birleştirmeler, SKNK ile nokta kaynakları başarıyla yapılabilmektedir. SKK yönteminde takımın geometrisi, dönme hızı, ilerleme hızı (kaynak hızı), açısı, dikey eksende basma kuvveti, dönme yönü, kaynaklanacak iş-parçalarının sabitlendikleri pozisyonlar gibi parametrelerin yanı sıra, SKNK yönteminde özellikle takımın kaynak işlemi esnasında parçalarla ne süre temas halinde kaldığı, kaynak işlemi öncesinde üzerinde düşünülüp, tasarımları yapıp, kontrol edilebilecek önemli değişkenlerdir [5, 6]. Öyle ki her iki yöntemin de başarıyla uygulanabilmesi, bir başka ifadeyle tasarım aşamasında kaynaklı

bağlantıdan elde edilmek istenen mukavemet ve diğer özelliklerin sağlanabilmesinin yolu direkt olarak bu değişkenlerin doğru seçilip uygulanmasından geçmektedir.

Bakır ve alaşımlarının kendi aralarında ve özellikle alüminyuma SKK ve SKNK ile birleştirilmesi ile ilgili çalışma sayısının son zamanlarda artış kaydettiği görülmektedir [7-12]. Bu durumu, bakır ve pirincin ergitme kaynak yöntemlerinde karşılaşılan ve yukarıda belirtilen problemlerin en aza indirilmesinin yanı sıra, özellikle elektrik iletimi kombinasyonu ile alüminyumun daha ucuz ve hafif, aynı zamanda mukavemetli olması sebebiyle bakır/alüminyum birleştirmelerinin yüksek doğru akım hatlarında kullanılması, alüminyum/pirinç ve bakır/pirinç birleştirmelerinin ise soğutma amaçlı ısı transfer sistemleri için iyi bir aday olması teşvik etmektedir [12-14].

Bu çalışmada, bakır ve pirinç malzemelerin benzer veya farklı malzemelerle SKK ve SKNK yöntemleriyle birleştirilmesinde yukarıda ifade edilen bazı önemli kaynak değişkenlerinin mekanik özellikleri doğrudan belirleyen kaynak hataları, mikroyapı değişimi, metaller arası bileşiklerin oluşumu, malzeme akışı/taşınması gibi hususları üzerine etkileri literatürde sunulan çalışmalar ışığında özetlenmektedir.

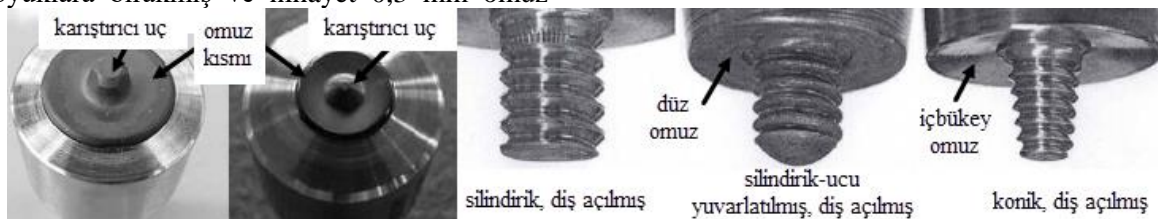
## 2. SKK / SKNK DEĞİŞKENLERİNİN BAKIR VE PİRİNÇ MALZEMELERİN KAYNAĞINA ETKİLERİ (EFFECTS OF FSW AND FSSW PARAMETERS ON WELDS OF COPPER AND BRASS MATERIALS)

### 2.1. Takım geometrisi (Tool geometry)

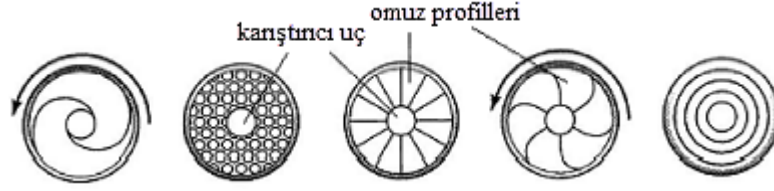
Dikkat edilecek olursa, önceki bölümde SKK ve SKNK yöntemlerinin başarısını etkileyen faktörler olarak vurgulanan değişkenlerin neredeyse tamamı takım ile ilişkilidir. Bu nedenle de değerlendirmeye takım üzerinden başlamak daha doğru olacaktır. Her iki yöntem için de takım denilince akla, detayları Şekil 1'de gösterilen, başlıca iki kısım gelmektedir ki her iki teknik için de bunların neden oldukları etkiler benzerdir. Takımı öncelikle omuz kısmı ve karıştırıcı uç olmak üzere birbirinden ayrı düşünmek ve değerlendirmek gerekmektedir. Omuz kısmının başlıca fonksiyonları arasında, kaynak için gerekli olan sıcaklık artışının yanı sıra ısı girdisinin sağlanması, plastikleşip yumuşamış malzemenin bir nevi dövme işlemine tabi tutulması ve bu malzemenin levha yüzeyinden dışarı kaçmasının önlenmesi sayılabilir. Deneysel çalışmalar, kaynak prosesi sırasında ulaşılan sıcaklığın yaklaşık %87'sinin omuz kısmı ile iş-parçaları arasındaki bu sürtünmeden kaynaklandığını ortaya koymuştur [16]. Hautala vd. [17] takım dönme

hızının artmasıyla beraber daha geniş bir omuz çapı kullanımının saf bakırın SKK mukavemetini arttığını belirtmiştir. Ayrıca farklı şekillerde girinti-çıkıntı, kanal vb. profillere sahip içbükey veya dışbükey geometrilerdeki omuzların (Şekil 2) kullanımıyla, malzeme deformasyonu ve karıştırmanın homojenliğinde bir gelişme sağlanabilmektedir [5]. Galvão vd. [18] yüksek fosforlu bakırın 5083-H111 alüminyum alaşımına SKK ile alın birleştirmesinde içbükey bir omuz yüzey formu kullanılırsa, omuzun alt kısmında yoğun bir malzeme karışımı sebebiyle  $Cu_9Al_4$  ve  $CuAl_2$  metaller arası bileşiklerin düzensizce dağıldığı bir kaynak yüzeyinin görüldüğünü bildirmiştir. Fakat yüzeyinde sarmal bir çıkıntıya sahip bir omuz kullanımında ise nispeten önemsiz oranda metaller arası bileşiklerin var olduğu, daha düzgün bir kaynak yüzeyi elde edilmiştir. Sarmal çıkıntılı omuzun, neredeyse tamamen  $CuAl_2$ 'den oluşan karışmış bir bölgeye, konik omuzun ise diğerinden daha az oranda metaller arası bileşik içeren ve  $Cu_9Al_4$ 'ce zengin bir karışımın olduğu bir kaynak metaline (KM) sebep olduğu da araştırmacılar tarafından ifade edilmiştir. Benzer şekilde Galvão vd. [19] düz, içbükey ve sarmal çıkıntıya sahip üç farklı takım omuz geometrisinin yanı sıra farklı takım dönme ve ilerleme hızlarının bakırın SKK ile alın kaynağındaki etkilerini incelemiştir. Sarmal çıkıntılı omuza sahip takımla çok daha etkili bir karıştırma sağlanabilirken, düz omuzda hatalı kaynaklar üretilebilmiştir. Ayrıca sarmal çıkıntılı omuzda diğerlerinden daha ince taneli bir KM elde edilmiştir ki bu durum, kaynaktaki daha yüksek sertlik ve mekanik özelliklere neden olmuştur. Düşük takım dönme ve kaynak hızlarında bütün kaynaklarda kök hatasıyla, ilerleme kenarlarında boşluk oluşumu gözlenirken, kaynak hızından bağımsız olarak takım dönme hızının artması sarmal omuzlu takımda hataların yok olmasını sağlamıştır. Teimurnezhad vd. [20] saf bakırın SKK ile alın kaynağında omuz kısmının batma derinliğinin etkisini incelemiştir. Bunun için kaynak başlangıcında omuz ile levha yüzeyleri arasındaki mesafe 0 (sıfır) alınırken, bu değer daha sonra 0,3 mm levhalara doğru kaydırılmıştır. Omuz kısmının levha yüzeylerinden içeri doğru girmesiyle, 0 mm mesafede iken kaynak yüzeyinde oluşan büyük oyuklar yerini KM içerisindeki daha küçük oyuklara bırakmış ve nihayet 0,3 mm omuz

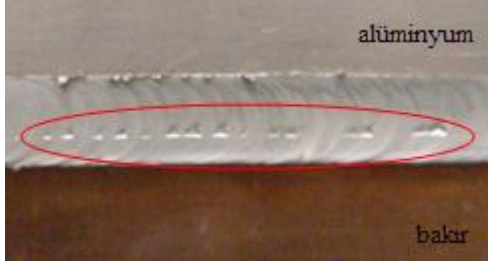
derinliğinde hatasız bir kaynak elde edilebilmiştir. Takımın diğer bir önemli kısmı olan karıştırıcı uca gelince, bu kısmın plastikleşmiş malzemenin karıştırılması ve taşınması açısından önemli olduğu görülmektedir. Burada, ucun çapı ve Şekil 1'de örnekleri gösterilen yüzey özellikleriyle (dış açılmış/açılmamış, silindirik, konik vb.) karışım bölgesinin genişliği, mikroyapı oluşumu ve malzeme akışı belirlenirken; genelde alın birleştirmeler için malzeme kalınlığından 0,1-0,3 mm daha kısa seçilen uç uzunluğu, karışım bölgesindeki plastikleşen malzemenin nüfuziyet derinliğinde etkili olmaktadır. Khodaverdizadeh vd. [21] saf bakırın SKK ile alın birleştirmesinde karıştırıcı uç formunun etkisini incelemek amacıyla, dış açılmış silindirik ve kare kesitli olmak üzere iki farklı uç geometrisi kullanmıştır. Kare kesitli uç kullanılması durumunda KM'de çok daha ince tanelerin (10  $\mu$ m'ye 15  $\mu$ m) oluştuğu, dolayısıyla sertlik, akma ve çekme mukavemetlerinde ana metale göre azalmaya rağmen, silindirik uca göre daha yüksek mekanik özellikleri getirdiği belirlenmiştir. Karıştırıcı ucun iş-parçası/parçaları yüzeyinden ne kadar derinliğe indiğiyle ifade edilebilen karıştırıcı uç batma derinliği ucun uzunluğuyla, uç uzunluğu ise malzeme kalınlığıyla ilişkilidir. Yetersiz batma derinliği durumunda, omuz kısmı iş-parçaları yüzeylerine temas etmeyecek, böylece yeterli ısı girdisi sağlanamayacağı gibi, karıştırılan malzeme etkin bir şekilde taşıyamayacaktır. Bu durumda da özellikle dikiş yüzeyinde tünel benzeri hataların oluşması kaçınılmaz olacaktır (Şekil 3). Gereğinden fazla batma derinliği ise başta ucun altlık levhaya teması ile hasara uğraması ve aşırı malzeme deformasyonu gibi sorunlara neden olacaktır. Siddharth ve Senthilkumar'a göre [22] saf Cu ile 5083 alüminyum alaşımının SKNK bindirme birleştirmesinde uç batma derinliğinin belirli bir değerin altında olması



Şekil 1. SKK ve SKNK için takım detayları ve bazı uç geometrisi örnekleri (Tool detail and some stirrer pin geometries in FSW and FSSW) [15]



Şekil 2. Çeşitli omuz yüzeyi profilleri (Various shoulder surface profiles) [5]



Şekil 3. Bir alüminyum/bakır birleştirmesinin yüzeyindeki tünel benzeri oyuk hatası (Tunnel-like cavity on the surface of aluminum/copper joint)

durumunda, alttaki bakır levha yeterince plastikleşmemekte; eğer belirli bir değerin üzerinde olursa da kolayca çatlak başlangıcına sebep olan büyük bir anahtar deliği söz konusu olmaktadır. Heideman vd. [23] saf Cu ile 6061-T651 alüminyum sacların SKNK ile bindirme şeklinde birleştirmesinde uç uzunluğundaki artışın dayanımın artmasına neden olduğunu, en uygun takım dönme hızında 2,3 mm uç uzunluğu kullanılıncaya, aynı devirdeki 1,8 mm uzunluğa kıyasla %70 daha yüksek performansa ulaşıldığı görülmüştür. Kısa uç kullanılması durumunda takım dalma derinliğinin artırılması nedeniyle kaynak performansının iki kattan daha fazla olumlu etkilendiği belirtilmiştir. SKNK yönteminde farklı olarak bazı araştırmacılara göre, tamamen veya büyük oranda anahtar deliği şeklinde bir boşluk olmaksızın kaynak kesiti sağlanabilmesinden dolayı uçsuz veya minimum uzunluktaki bir karıştırıcı uca sahip takımlarla daha sağlam kaynaklar yapılabilmektedir. Ayrıca, batma derinliği hususunda üstteki parça kalınlığının yanı sıra, alttaki parçadan da ne kadar malzemenin karışıma uğramasının beklendiği de dikkate alınmalıdır. Tüm bunlardan dolayı, optimum bir çap ve geometride, yüzey profili iyi tasarlanmış omuz ile uygun çap ve uzunluğa sahip bir karıştırıcı uçtan oluşan takımın, başarılı bir birleştirmenin kilidini açan anahtar olduğu rahatlıkla söylenebilir.

## 2.2. Takım dönme hızı ve takım ilerleme hızı (Tool rotation speed and tool travel speed)

Takım dönme hızının hem SKK hem de SKNK teknikleri için belki de en yaygın olarak üzerinde çalışılan değişken olduğunu söylemek mümkündür. Çünkü sürtünme sonucu açığa çıkan ısıdan tutun da plastik deformasyona uğrayan malzeme miktarı, meydana gelen kuvvetlerin büyüklüğü, malzeme akışı/taşınması, kaynak bölgesini oluşturan mikroyapı bölgelerinin geometrileri, mikroyapıların tane büyüklüğü, takım aşınmasının derecesi, muhtemel

kaynak hatalarının tip ve büyüklükleri ile özellikle farklı metallerin kaynağında görülen çeşitli metaller arası bileşiklerin miktar ve şekillerine kadar geniş bir kapsamda birleştirme özelliklerini belirleyici etkisi vardır [24-26]. Takım dönme hızının artmasıyla daha fazla sürtünme ısıya açığa çıkacağından, kaynak sıcaklıkları da artacaktır ki bu durumda malzemenin yoğun bir şekilde karışmasına neden olur. Ancak takım dönme hızının yanı sıra ısı girdisinin yeterinden fazla olmasıyla KM ve ITAB'da dislokasyon yoğunluğunda artışın yanı sıra, tanelerde irileşme ve mekanik özelliklerde bir azalma görülebilir [26]. Takımın, proses sırasında kaynak hattı boyunca hareket etmesiyle ifade edilebilen, takım ilerleme hızı ya da başka bir deyişle kaynak hızı, özellikle ısı girdisi ve malzeme karışımı/taşınması açısından takım dönme hızıyla benzer etkileri oluşturan diğer önemli parametredir. Yüksek kaynak hızlarında yetersiz malzeme akışı ve ısı girdisinin neden olduğu kaynağın içinde oyuk, yüzeyinde tünel şeklinde boşluklar, kök nüfuziyetsizlikleri ve yüzey bozuklukları görülmektedir [4, 27]. Bununla birlikte, KM'deki sertlikler nispeten daha yüksek kaynak hızlarında yani düşük ısı girdisi şartlarında tanelerin incelmesinden dolayı artış göstermektedir [25-30]. Genel olarak diğer değişkenler sabit iken, aşırı yüksek veya düşük takım dönme ve ilerleme hızlarının kaynak özelliklerine olumsuz yönde etkilerinin olduğu da bilinmektedir. Bu nedenle, birbirlerinden bağımsız değerlendirilemeyecek olan bu iki faktör arasında uygun bir kombinasyonun sağlanması, kaynağın başarısı açısından çok önemlidir [4]. Örneğin Surekha ve Els-Botes [31] saf bakır levhaların 50-250 mm/dak arasındaki farklı kaynak hızlarında SKK ile alın altına kaynağında, uygun takım dönme hızı kullandığında, kaynak hızındaki artışın mukavemet değerlerini arttırdığını belirtmişlerdir. Moghaddam vd. göre [32] CuZn30 pirinç levhaların SKK ile alın birleştirmesinde takım ilerleme hızının artmasıyla, KM içerisinde ultra ince tanelerden oluşan karışım bantları yoğunluğu artış göstermiş, bu da çekme ve akma mukavemetlerinde bir miktar artışa neden olmuştur.

Genel itibariyle, alüminyum malzemenin bakır malzemeye birleştirmelerinde karışım bölgesinde iki farklı mikroyapı bölgesinin varlığı söz konusu olmaktadır. Birincisi bakırca zengin parçacıklarla takviye edilmiş alüminyum matris bölgesi, diğeri de bakır karışım bölgesidir. Takım dönme hızının artması veya ilerleme hızının azalmasıyla çekme testi sırasında çatlak başlangıcına ve ilerlemesine neden olan  $Al_4Cu_9$ ,  $AlCu$ ,  $Al_2Cu$  gibi metaller arası bileşiklerin

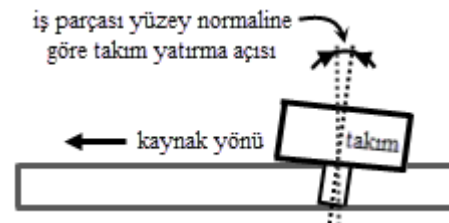


oluşturduğu bölgeler de artmaktadır ki bunlar, Al-Cu sisteminde yaklaşık 300 °C civarında kolaylıkla oluşabilmektedirler [11]. Bununla birlikte, Cu-T2 ile 5A06 alüminyum alaşımının 950-1180 dev/dak takım dönme hızlarında ve 150-235 mm/dak kaynak hızlarında alın birleştirmesinde, en düşük kaynak ve takım dönme hızlarında herhangi bir metaller arası faz oluşmadan, sağlam bir kaynağın yapılabildiği de rapor edilmiştir [33]. Bu iki parametrenin artmasıyla alüminyum matris içerisine sürüklenen bakır miktarında artış gözlenmektedir. Isı girdisinin artışıyla beraber karıştırmanın da artması sonucu artan plastik şekil değişimiyle, iki malzemenin deformasyon kabiliyetlerinin farklı olmasından kaynaklanan, matriste alüminyumca veya bakırca zengin bantlar daha yaygın olarak oluşmaya başlamaktadır. Ayrıca metaller arası bileşiklerin kalınlıkları da bu iki değişkenden etkilenmektedir. Bu alüminyum kompozit yapısı ile bakır veya alüminyumca zengin bantların varlığı karışım bölgesindeki sertlik değerlerini yükseltmektedir. Saf bakırın SKK yöntemiyle alüminyum veya alaşımına alın ve bindirme kaynağıyla ilgili çalışmalarda açıkça görülmektedir ki, çok düşük kaynak hızlarında veya yüksek takım dönme hızlarında, alüminyum levhadaki KM'de nispeten fazla miktarda oluşan bakır parçacıklar ve sert, gevrek  $Al_4Cu_9$ ,  $Al_2Cu$ ,  $Al_2Cu_3$  gibi fazların neden olduğu mikro çatlaklar; yüksek kaynak hızlarında ise makro boşluklar kaynağın sağlamlığını olumsuz etkilemektedir [9, 34-36]. Barlas ve Uzun [12] saf Cu ve CuZn37 pirinç levhaları farklı takım dönme hızlarında SKK ile alın alına birleştirmiştir. Araştırmacılar, takım dönme hızının artmasıyla birleştirmelerin akma, çekme ve uzama değerlerinin arttığını, kök ve yüzey eğme testlerinde de benzer bir eğilimin gözlemlendiğini belirtmişlerdir. Yüksek takım dönme hızına bağlı olarak ITAB'ların genişliği artsa da, en düşük takım dönme hızında yetersiz ısı ve karıştırma sebebiyle kök nüfuziyetsizliği görülmüştür. Siddharth ve Senthilkumar [22] saf bakırla Al5083 alüminyum alaşımının SKNK ile bindirme şeklinde birleştirmesinde takım dönme hızı ve takım bekleme süresinin belirli değerler üzerinde tutulmasıyla, aşırı ısı girdisi nedeniyle birleştirmenin deforme olup, malzemenin aşırı bir şekilde dışarı taşıdığını belirtmiştir. Eğer bu iki parametre belirli değerlerin altında olursa, bu kez de düşük ısı girdisi ve karışım oranı sebebiyle malzemeler yeterince yumuşamamakta ve tatmin edici bir birleşme ortaya çıkmamaktadır. Heideman vd. [23] saf Cu ile 6061-T651 alüminyum sacları SKNK ile bindirme şeklinde birleştirmesinde karıştırıcı uç uzunluğu, takım batma derinliği, takım dönme hızı ve kaynak süresinin etkilerini değerlendirmiştir. Takım dönme hızının kaynak mukavemeti üzerine en önemli etken olduğu, takım dönme hızının 1000 dev/dak'dan iki katına çıkarılmasıyla mukavemetin %150 arttığı, üç katına çıkarıldığında ise önemli bir değişime neden olmadığı belirlenmiştir [23]. Bunun nedeni olarak, dönme hızına bağlı olarak ulaşılan uygun maksimum

sıcaklıktan sonra sivilaşmanın meydana geldiği ve takımın bir nevi patinaj yapması gösterilmiştir. Kaynak süresinin ise birleştirme performansları üzerine belirleyici bir etkisi gözlenmemiştir. En iyi birleştirmenin mikroyapı incelemelerinde, alttaki bakır levhadan yukarı doğru taşınan çengel şekilli bakır malzemenin, iki levha arasında bir nevi kilitleyici rolü nedeniyle kaynak performansını arttırdığı, bu çengelin ucu ile anahtar deliği arasında kalan alüminyum karışım metali mesafesinin doğru orantılı olarak dayanımı arttırdığı sonucuna varılmıştır. Yukarıda sunulan örnekler ışığında elde edilen sonuçlara ilave olarak, özellikle yüksek hızda üretim yapabilmek yani kaynak hızının artırılması amacıyla, yüksek takım dönme hızları kullanımının takım aşınmasını kolaylaştıracağı da gözden kaçırılmamalıdır. Bu iki parametrenin böyle seçilmesi durumunda geleneksel çeliklerden (sıcak iş, yüksek hız çelikleri vb.) yapılan takımların yetersiz kalabileceği ve dolayısıyla çeşitli karbür, nitrür esaslı malzemelerin takım yapımında uygun olabileceği düşünülmektedir.

### 2.3. Takım yatırma açısı (Tool tilt angle)

Takımı Şekil 4'de gösterildiği biçimde, kaynak hattına göre ilerleme yönüne ters olacak şekilde, dikey ekseninde birkaç derece yatırmak yani bir takım batma açısı kullanmak, plastikleşen malzemenin uç tarafından daha etkin ve homojen bir şekilde taşınması (özellikle yukarıdan aşağıya, önden arkaya doğru) ve omuzun arka kısmındaki dövme kuvvetini arttırmak açısından yararlı olabilmektedir. Çoğu uygulama için bu açı 1-3° arasında olumlu sonuç verirken, hiç açı uygulamamak (0°) ya da 3°'nin üzerinde uygulamak kaynak bölgesinde çeşitli hatalara neden olabilmektedir. 0° takım açısında özellikle iş-parçaları yüzeylerinden gereksiz malzeme kaldırılması sonucunda aşırı kaynak çapaklarının oluşacağı, aşırı açıda da ısı girdisi ve dövme kuvveti miktarlarının artacağı dikkate alınmalıdır. Mehta vd. [27] saf bakırla AA6061-T651 alüminyum alaşımını iki farklı takım tasarımıyla, üç farklı takım ötelemesiyle, farklı takım ilerleme hızları ve takım açıları kullanarak birleştirmiştir. Sivriltilmiş uç kullanımında kök kısımlarda büyük boşluklarla karşılaşmış ve takıma açı verilmezse, düşük dövme kuvveti nedeniyle malzemelerde uygun bir karışımın meydana gelmediği görülmüştür. Bu durumda KM içerisinde çatlaklar oluşmuştur. Ayrıca 0° takım açısında kaynak çapakları meydana gelmiştir.



Şekil 4. Takım açısının şematik gösterimi (A schematic illustration of tool tilt angle)

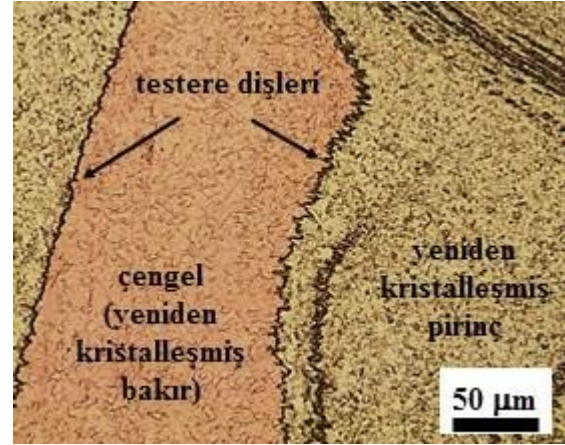
## 2.4. Takım basma kuvveti (Tool load)

Dikey doğrultuda takım basma kuvveti veya takım dalma kuvveti, takım ile malzeme arasındaki temasın sürdürülebilmesi ve yeterli ısı girdisi ile dövmenin elde edilebilmesi, dolayısıyla karışım bölgesinde tam nüfuziyetin sağlanabilmesi açısından önemlidir. Dövme kuvvetinin bu şekilde artmasıyla ince taneli bir mikroyapıda yüksek sertlik ve mukavemetler elde edilebilmektedir. Ayrıca yetersiz kuvvetler yetersiz birleşmelere, aşırı kuvvetler ise kaynak kesitinde incelmeye neden olmaktadır [37, 38]. Barlas [39] CuZn30 pirinç sacı DP600 çelik saca farklı 3,2-4,8 kN takım basma kuvvetleriyle iki farklı takım bekleme sürelerinde (8 s ve 12 s) SKNK ile birleştirmiştir. Çalışmada takım basma kuvvetinin birleştirme özelliklerini etkileyen başlıca parametre olduğu; takım basma kuvveti ve bekleme süresinin artmasıyla, omuz çevresiyle karıştırıcı uç arasında kalan bölgedeki pirinç/çelik arayüzeyinde iyi bir metalürjik bağlanmanın meydana geldiği, dolayısıyla nokta kaynaklarının kopma yüklerinin arttığı belirlenmiştir. SKNK sırasında 600 °C civarında tepe sıcaklığı kaydedilirken, bu sıcaklığın pirinç malzemede yeniden kristalleşme için yeterli, östenitleme sıcaklığından düşük olduğundan çelik malzemede martenzitik dönüşüm için yetersiz olduğu ifade edilmiştir. Genel olarak pirinç malzemede yeniden kristalleşmeye rağmen, bir yumuşama belirlenirken, pirinç KM'de görülen soğan halkaları yapısının sertliğin artışına katkıda bulunduğu da ifade edilmiştir.

## 2.5. Takım bekleme süresi (Tool hold time)

SKNK yönteminde, dönmekte olan takımın levha yüzeylerinde maksimum kuvvette kaldığı süre olarak tanımlanabilen takım bekleme süresi, diğer parametrelere benzer şekilde ısı üretimi ve omuzla uç çevresindeki malzemenin plastikleşip yönleneceği ve dolayısıyla kaynağın kesit geometrisi bakımından kaynak kalitesini etkilemektedir. SKNK'da takım ilerlemesi olmadığından, bunun yerini bir bakıma takım bekleme süresinin aldığını söyleyebiliriz [40]. Barlas [8] saf bakır ve CuZn30 pirinç sacların SKNK ile bindirme formundaki birleştirmesinde takım dönme hızı, levha pozisyonu ve takım bekleme süresinin etkilerinin incelemiştir. Pirinç sac üstte konumlandırıldığında, takım dönme hızı ve/veya bekleme süresinin artmasıyla kopma yüklerinin arttığı rapor edilmiştir. Bunun nedeni olarak artan ısı girdisi ve daha yoğun karıştırma sonucu metalürjik bağlanma alanının genişlemesi gösterilmiştir. Bunlardaki artış kaynak bölgesinde ölçülen tepe sıcaklıklarını da arttırmıştır. En yüksek kopma yükünün olduğu birleştirmenin mikroyapı incelemesinde iyi bir metalürjik bağlanmanın yanı sıra Şekil 5'de gösterilen, testere dişleri benzeri girinti çıkıntılara sahip çengel oluşumlarının, kilitleyici etki oluşturup dayanımı arttırdığı ifade edilmiştir. Abbass vd. [41] 2024-T3

alüminyumun saf bakıra SKK ile bindirme birleştirmesinde 800-1250 dev/dak farklı takım dönme hızlarının, 30-90 s dalma süresinin ve tamamen silindirik, konik silindirik, dış açılmış-kanallı silindirik uç geometrilerinin etkilerini değerlendirmiştir. Batma zamanının diğer faktörlerden daha fazla önem taşıdığı, bu sürenin artmasının mekanik özellikleri olumlu etkilediği belirtilmiştir.



Şekil 5. SKNK ile Cu/CuZn30 birleştirmesinde görülen testere dişleri benzeri yapıya sahip çengel (Hook with saw-teethes for Cu/CuZn30 joint in FSSW) [8]

## 2.6. İş-parçalarının pozisyonları / takım dönme yönü (Position of work-pieces / tool rotation direction)

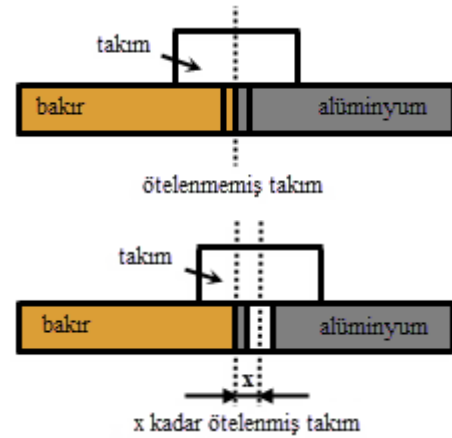
SKK ile alın birleştirmeler için kaynaklanacak malzemeler aynı olduklarında, bunların takım ilerleme/dönme yönüne göre sabitlendikleri konum yani malzeme pozisyonu (takım ilerleme yönüne göre sağ veya sol taraf) çok belirleyici etkilere sahip olmamaktadır. Çünkü kaynak işlemi sırasında hem ötelenen hem de takım arkasına çekilen malzeme aynıdır. Ancak bu durumun önemi, farklı malzemelerin kaynağında değişmekte, birleştirmelerin kalite ve sağlamlıkları diğer değişkenlerde olduğu gibi bundan da etkilenmektedir. Burada nispeten malzemelerin sertlik veya deformasyon kabiliyetleri sabitlenecek tarafın belirlenmesinde önem arz etmektedir. Örneğin nispeten sert olan malzemenin bir taraftan diğerine taşınması aynı şartlar altında diğerine göre daha zor olabilmekte, dolayısıyla homojen olmayan bir malzeme karışımı ve taşınması, boşluk ve tünel benzeri hatalara yol açabilmektedir. SKNK veya SKK'da bindirme formundaki birleştirmeler için malzeme pozisyonu, üstte veya altta olmasıyla, yani omuz kısmıyla temas edip etmemesine göre farklılık arz etmektedir. Burada ise başta malzemelerin ısı iletkenlikleri ile mekanik özellikleri belirleyici olmaktadır. Nispeten düşük ısı iletkenliğe sahip malzemenin üstte konumlandırılmasıyla, kaynak işlemi sırasında aynı şartlarda daha fazla ısı girdisi dolayısıyla daha fazla bir karıştırmanın oluşabileceği görülmektedir. Ayrıca nispeten daha mukavemetli olan

malzemenin altta konumlandırıldığında, yeterli derecede plastik deformasyona uğratılmadığı da görülmektedir [8]. Takımın saat yönünde veya tersi yönde dönmesi ise yine farklı metallerin kaynağında, dış açılmış karıştırıcı uçlar kullanılmasında, malzemenin birinin diğerine doğru taşınması durumunda önem kazanmaktadır. Akbari vd. [42] levha pozisyonlarının 7070 alüminyumun saf bakıra SKK ile bindirme birleştirmesinde etkilerini incelemek için diğer parametreler sabit iken, önce bakırı alüminyum üzerine, ikinci olarak da altına koyarak birleştirmiştir. Nispeten düşük ısıl iletkenliğe sahip alüminyum levhanın üstte olması durumunda, alüminyum ile takım arayüzeyinde nispeten daha fazla ısı girdisi sağlanabilmiş, bu da ince taneli ve hatasız bir kaynak bölgesi oluşumuna neden olmuştur. Ters durumda ise bakırın yüksek ısıl iletkenliği nedeniyle daha düşük ve yetersiz bir ısı girdisi meydana gelmiş ve uygun miktarda bir plastik deformasyona ulaşılmamış ki bunun sonucu olarak kanal benzeri hatalar ve kaynakta zayıflama tespit edilmiştir.

### 2.7. Takım karıştırıcı ucunun ötelemesi / takım ekseninin konumu (Tool pin offset / position of tool axis)

Farklı malzemelerin SKK yöntemiyle alın kaynağında, birleştirilecek malzemelerin alın altına eşleşen yüzeylerine göre takımın Şekil 6'daki gibi, iş-parçalarından birine doğru ötelenmesi suretiyle kaynağın yapılması da önemli olmaktadır. Takımın bir malzeme tarafına doğru ötelenmediği, bir başka deyişle takım ekseninin alın altına birleşme yüzeylerinde olması durumunda, farklı malzemelerin farklı ısıl iletkenlikleri ve mekanik özellikleri sebebiyle yeterli karışımın oluşmadığı, böylece önemli kaynak hatalarının görüldüğü bilinmektedir. Genel olarak takım ötelemesi öncelikle daha yumuşak ve ısıl iletkenliği düşük malzemeye doğru yapılırken, birçok uygulamada 2 mm'ye kadar ötelemelerin iyi sonuçlar verdiği ifade edilmiştir. Ancak bu öteleme miktarında, takım geometrisi gözden kaçırılmaması gereken önemli bir husustur. Burada omuz çapının ısı girdisini, karıştırıcı ucun çapı ile şeklinin de karıştırılan malzeme ve miktarını etkileyeceği unutulmamalıdır. Çakır ve Çelik'e [10] göre saf 1050 alüminyumla saf bakırın SKK ile alın birleştirmesinde eğer takım eksenini hiç ötelenmez ise oldukça zayıf birleştirmelerle karşılaşmaktadır. En düşük kaynak hızında ve orta seviyedeki takım dönme hızında, takımın 1 mm ötelenmesiyle ise daha yüksek mekanik özelliklere ulaşılmaktadır. Ayrıca kaynak merkezindeki  $CuAl_2$  ve  $Al_4Cu_9$  fazların oluşumu nedeniyle sertlik artışının söz konusu olduğu belirtilmiştir. Benzer sertlik artışı Xue vd. [43] tarafından takım ötelemesiyle ilgili çalışmada da rapor edilmiştir. Bununla birlikte, saf bakır ile saf alüminyumun SKK ile alın birleştirmelerinde, nispeten daha sert bakır levhanın ilerleme tarafına konulmasıyla birlikte takımın kesinlikle alüminyuma doğru en az 1,5

mm ötelenmesi gerektiği vurgulanmaktadır. Böylece iyi bir metalürjik bağlanma elde edilebilirken, tersi durumda ise alüminyum parçada büyük hatalar oluşmaktadır [44, 45].



Şekil 6. Ötelenmemiş ve belirli bir mesafe ötelenmiş takımın örnek birleştirmelerde şematik gösterimleri (A schematic illustration of tool offset)

### 3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

SKK ve SKNK yöntemlerinde bakır ve pirinç malzemelerin en az birinin bir birleştirmede kullanıldığı uygulamalarda, takımla ilintili olan geometrisi, dönme hızı, ilerleme hızı, basma kuvveti, açısı, ötelenmesinin yanı sıra levha pozisyonları gibi birçok önemli değişken bulunmaktadır. Hem SKK hem de bunun bir türevi olan SKNK yöntemlerine isimlerini veren iki olay "sürtünme", bunun sonucu olarak sıcaklık artışı ve "karıştırma", bunun sonucu olarak da malzeme akışı ve taşınması, bu parametrelerce kontrol edilmektedir. Isı girdisi ve malzeme akışı ise kaynak bölgesindeki metalürjik yapı ve özellikleri ile kaynak hatalarını ve büyüklüklerini belirlemektedir. Bu nedenle, önceki bölümde örnekleri açıklandığı gibi, etkileri açısından farklılıklara sahip olsalar da kaynak işlemleri öncesinde tasarımları yapıлып, nicel değerlerin seçiminde bu faktörleri birbirlerinden ayrı, bağımsız olarak ele almak, istenilen nitelik ve sağlamlıkta birleştirmelerin yapılamamasına neden olacağı sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Bu nedenle, makale çalışması kapsamında irdelenen ilgili parametrelerin deneysel sonuçları aşağıdaki gibi verilebilir:

1- Uygun profil ve geometrilerdeki takımların kullanılmasıyla, birleştirme bölgesinde yeterli bir malzeme deformasyonu, homojen bir karıştırma ve nispeten hiç ya da daha az metaller arası bileşik oluşumu sağlanabilmektedir. Bu durum ise mekanik özelliklerde iyileşmeye neden olmaktadır.

2- Takım omuz kısmı ve/veya karıştırıcı uç batma derinliğinin uygunsuzluğu, yetersiz ısı girdisi ve karıştırmaya sebep olacağından, kaynak yüzeyine açık ya da kaynak metali içerisinde tünel benzeri büyük oyuk hataları ve kök nüfuziyetsizlikleri meydana gelecektir.

3- Takım dönme hızının artması ve/veya ilerleme hızının azalması, sürtünme ısısını arttırıp kaynak bölgesindeki sıcaklığın ve malzemelerin karışım oranının artmasıyla sonuçlanacaktır. Isı girdisinin gereğinden fazla olması KM ve ITAB'da dislokasyon yoğunluğunun artmasına, kaba tanelere ve mekanik özelliklerde azalmaya neden olabilir. Ters durumda ise kaynaktaki oyuk, yüzeyinde tünel şeklinde boşluklar, kök nüfuziyetsizlikleri ve yüzey bozuklukları görülmektedir.

4- Genel olarak takıma bir açı verilememesi dövme kuvvetini azaltacak, aynı zamanda iş-parçaları yüzeylerinde aşırı kaynak çapakları oluşturacaktır.

5- Doğru oranda takım basma kuvvetiyle yeterli ısı girdisi ve dövme etkisi sağlanabilir. Böylece ince taneli bir mikroyapı oluşumuyla yüksek sertlik ve mukavemetler elde edilebilir. Yetersiz kuvvetler yetersiz birleşmelere, aşırı uygulanan kuvvetler ise kaynak kesitinde incelmeye neden olmaktadır.

6- SKNK yönteminde takımın malzeme yüzeylerinde takım bekleme süresi artarsa, ısı girdisi artışı ve yoğun bir karıştırma sonucu metalürjik bağlanma alanının genişlemesi söz konusu olabilmektedir.

7- Bindirme ve nokta birleştirmelerinde, ısıl iletkenliği düşük malzemenin üstte konumlandırılmasıyla, daha yüksek ısı girdisi ve daha fazla bir karıştırmanın oluşabileceği görülmektedir. SKNK'da nispeten daha mukavemetli olan malzemenin altta olursa, yeteri derecede plastik deformasyona uğratılmama riski bulunmaktadır.



8- Takım geometrisi de dikkate alınarak, farklı malzemelerin kaynağında, takımın daha yumuşak ve ısıl iletkenliği düşük olan malzemeye doğru yaklaşık 1-3 mm ötelenmesi, kaynak özellikleri açısından iyi sonuçlar verebilmektedir.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] A. M. Russell, K. L. Lee, *Structure-Property Relations in Nonferrous Metals*, John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2005, pp. 301-308.
- [2] J. E. Bringas, M. L. Wayman, *Nonferrous Metals*, 4th ed. on CD-ROM, Casti Publishing Inc, Alberta, 2003, pp. 139-158.
- [3] N. Xu, R. Ueji, Y. Morisada, H. Fujii, "Modification of mechanical properties of friction stir welded Cu joint by additional liquid CO<sub>2</sub> cooling," *Materials and Design*, vol. 56, pp. 20-25, 2014.
- [4] Y. F. Sun, N. Xu, H. Fujii, "The microstructure and mechanical properties of friction stir welded Cu-30Zn brass alloys," *Materials Science & Engineering A*, vol. 589, pp. 228-234, 2014.
- [5] R. S. Mishra, M. W. Mahoney, *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, 2007, pp. 1-368.
- [6] G. M. Xie, H. B. Cui, Z. A. Luo, W. Yu, J. Ma, G. D. Wang, "Effect of Rotation Rate on Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded DP780 Steel," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 32, no. 4, pp. 326-332, 2016.
- [7] K. P. Mehta, V. J. Badheka, "A Review on Dissimilar Friction Stir Welding of Copper to Aluminum: Process, Properties, and Variants," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 31, no. 3, pp. 233-254, 2016.
- [8] Z. Barlas, "Effect of friction stir spot weld parameters on Cu/CuZn30 bimetal joints," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 80, no. 1, pp. 161-170, 2015.
- [9] Z. Barlas, H. Uzun, "Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yapılmış Cu/Al-1050 Alın Birleştirmesinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 25, no. 4, pp. 857-865, 2010.
- [10] S. Celik, R. Cakir, "Effect of Friction Stir Welding Parameters on the Mechanical and Microstructure Properties of the Al-Cu Butt Joint," *Metals*, vol. 6, pp. 133-147, 2016.
- [11] A. Abdollah-Zadeh, T. Saeid, B. Sazgari, "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded aluminum/copper lap joints," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 460, no. 1-2, pp. 535-538, 2008.
- [12] Z. Barlas, H. Uzun, "Microstructure and mechanical properties of friction stir butt-welded dissimilar pure copper/brass alloy plates," *International Journal of Materials Research*, vol. 101, no. 6, pp. 801-807, 2010.
- [13] Z. P. Cai, B. Q. Ai, R. Cao, Q. Lin, J. H. Chen, "Microstructure and properties of aluminum AA6061-T6 to copper (Cu)-T2 joints by cold metal transfer joining technology," *Journal of Materials Research*, vol. 31, no. 18, pp.2876-2887, 2016.
- [14] G. Huang, X. Feng, Y. Shen, Q. Zheng, P. Zhao, "Friction stir brazing of 6061 aluminum alloy and H62 brass: Evaluation of microstructure, mechanical and fracture behavior," *Materials and Design*, vol. 99, pp. 403-411, 2016.
- [15] Z. Barlas, "Sürtünme Karıştırma Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Cu İle CuZn37 Levhaların Mekanik ve Mikroyapı Özellikleri," Dr. Tezi, Sakarya Üniv. Metal Eğt. A.B.D., Sakarya, Türkiye, 2009.
- [16] D. Lohwasser, Z. Chen, *Friction Stir Welding- from Basics to Applications*, Wood Head Publishing Limited, 2010.
- [17] T. Hautala, T. Tianien, "Friction stir welding of copper," in *Proceedings of the Sixth International Conference on Trends in Welding*

- Research*, Pine Mountain, GA, ASM International, 2003, pp. 324-328.
- [18] I. Galvão, J. C. Oliveira, A. Loureiro, D. M. Rodrigues, "Formation and distribution of brittle structures in friction stir welding of aluminium and copper: Influence of shoulder geometry," *Intermetallics*, vol. 22, pp. 122-128, 2012.
- [19] I. Galvão, R. M. Leal, D. M. Rodrigues, A. Loureiro, "Influence of tool shoulder geometry on properties of friction stir welds in thin copper sheets," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 213, no. 2, pp. 129-135, 2013.
- [20] J. Teimurnezhad, H. Pashazadeh, A. Masumi, "Effect of shoulder plunge depth on the weld morphology, macrograph and microstructure of copper FSW joints," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 22, pp. 254-259, 2016.
- [21] H. Khodaverdizadeh, A. Heidarzadeh, T. Saeid, "Effect of tool pin profile on microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper joints," *Materials and Design*, vol. 45, pp. 265-270, 2013.
- [22] S. Siddharth, T. Senthilkumar, "Optimization of Friction Stir Spot Welding Process Parameters of Dissimilar Al 5083 and C 10100 Joints Using Response Surface Methodology," *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, vol. 57, no. 5, pp. 456-466, 2016.
- [23] R. Heideman, C. Johnson, S. Kou, "Metallurgical analysis of Al/Cu friction stir spot welding," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 15, no. 7, pp. 597-604, 2010.
- [24] G. M. Xie, Z. Y. Ma, ve L. Geng, "Development of a fine-grained microstructure and the properties of a nugget zone in friction stir welded pure copper," *Scripta Materialia*, vol. 57, no. 2, pp. 73-76, 2007.
- [25] H. S. Park, T. Kimura, T. Murakami, Y. Nagano, K. Nakata, M. Ushio, "Microstructures and mechanical properties of friction stir welds of 60% Cu-40% Zn copper alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 371, no. 1-2, pp. 160-169, 2004.
- [26] H. Khodaverdizadeh, A. Mahmoudi, A. Heidarzadeh, E. Nazari, "Effect of friction stir welding (FSW) parameters on strain hardening behavior of pure copper joints," *Materials and Design*, vol. 35, pp. 330-334, 2012.
- [27] K. P. Mehta, ve Vishvesh J. Badheka, "Experimental investigation of process parameters on defects generation in copper to AA6061-T651 friction stir welding," *Int'l Journal of Advances in Mechanical & Automobile Eng. (IJAMAE)*, vol. 3, no. 1, pp. 55-58, 2016.
- [28] C. Meran, "The joint properties of brass plates by friction stir welding," *Materials and Design*, vol. 27, no. 9, pp. 719-726, 2006.
- [29] G. Çam, H.T. Serindağ, A. Çakan, S. Mistikoğlu, H. Yavuz, "The effect of weld parameters on friction stir welding of brass plates," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 39, no. 6, pp. 394-399, 2008.
- [30] J. J. Shen, H. J. Liu, F. Cui, "Effect of welding speed on microstructure and mechanical properties of friction stir welded copper," *Materials and Design*, vol. 31, no. 8, pp. 3937-3942, 2010.
- [31] K. Surekha, A. Els-Botes, "Development of high strength, high conductivity copper by friction stir processing," *Materials and Design*, vol. 32, no. 2, pp. 911-916, 2011.
- [32] M. Sarvghad Moghaddam, R. Parvizi, M. Haddad-Sabzevar, A. Davoodi, "Microstructural and mechanical properties of friction stir welded Cu-30Zn brass alloy at various feed speeds: Influence of stir bands," *Materials and Design*, vol. 32, no. 5, pp. 2749-2755, 2011.
- [33] P. Liu, Q. Shi, W. Wang, X. Wang, Z. Zhang, "Microstructure and XRD analysis of FSW joints for copper T2/aluminium 5A06 dissimilar materials," *Materials Letters*, vol. 62, no. 25, pp. 4106-4108, 2008.
- [34] T. Saeid, A. Abdollah-zadeh, B. Sazgari, "Weldability and mechanical properties of dissimilar aluminum-copper lap joints made by friction stir welding," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 490, no. 1-2, pp. 652-655, 2010.
- [35] S. A. Khodir, M. M. Z. Ahmed, Essam Ahmed, Shaymaa M. R. Mohamed, H. Abdel-Aleem, "Effect of Intermetallic Compound Phases on the Mechanical Properties of the Dissimilar Al/Cu Friction Stir Welded Joints," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 25, no. 11, pp. 4637-4648, 2016.
- [36] V. C. Sinha, S. Kundu, S. Chatterjee, "Microstructure and mechanical properties of similar and dissimilar joints of aluminium alloy and pure copper by friction stir welding," *Perspectives in Science*, vol. 8, pp. 543-546, 2016.
- [37] C. Meran, V. Kovan, "Microstructures and mechanical properties of friction stir welded dissimilar copper/brass joints," *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 39, no. 8, pp. 521-530, 2008.
- [38] Y. F. Sun, H. Fujii, "Investigation of the welding parameter dependent microstructure and mechanical properties of friction stir welded pure copper," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, no. 26, pp. 6879-6886, 2010.
- [39] Z. Barlas, "Weldability of CuZn30 brass/DP600 steel couple by friction stir spot welding," *Acta Physica Polonica A*, basılacak.

- [40] Z. Zhang, X. Yang, J. Zhang, G. Zhou, X. Xu, B. Zou, "Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir spot welded 5052 aluminum alloy," *Materials and Design*, vol. 32, no. 8-9, pp. 4461-4470, 2011.
- [41] M.K. Abbass, S. Hussein, A.A. Kudair, "Optimization of Friction Stir Spot Welding Parameters of Dissimilar Welded Joints of Aluminum Alloy (AA2024T3) with Pure Copper Sheets," *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, vol. 4, no. 12, pp. 514-526, 2015.
- [42] M. Akbari, R. Abdi Behnagh, A. Dadvand, "Effect of materials position on friction stir lap welding of Al to Cu," *Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 17, no. 7, pp. 581-588, 2012.
- [43] P. Xue, B. L. Xiao, D. R. Ni, Z. Y. Ma, "Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds," *Materials Science and Engineering A*, vol. 527, no. 21-22, pp. 5723-5727, 2010.
- [44] P. K. Sahu, S. Pal, S. K. Pal, R. Jain, "Influence of plate position, tool offset and tool rotational speed on mechanical properties and microstructures of dissimilar Al/Cu friction stir welding joints," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 235, pp. 55-67, 2016.
- [45] P. Xue, D. R. Ni, D. Wang, B. L. Xiao, Z. Y. Ma, "Effect of friction stir welding parameters on the microstructure and mechanical properties of the dissimilar Al-Cu joints," *Materials Science and Engineering A*, vol. 528, no. 13-14, pp. 4683-4689, 2011.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 02.05.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 31.03.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.303222	

## Kıyı yerleşkesi arazi kullanım planlaması için zemin özelliklerinin araştırılması, Kandıra, İzmit

T. Fikret Kurnaz\*<sup>1</sup>

### ÖZ

Deprem, heyelan vb. doğal afetlere elverişli topoğrafyaya sahip yerleşim alanlarının planlamalarında, zemin özelliklerinin detaylı bir şekilde araştırılması, güvenilir yapılaşmalar açısından bir gerekliliktir. Gerek yeni yerleşim alanlarının imara açılması gerekse de mevcut yerleşim alanlarının revize edilmesinde bölgesel ve parsel bazında yapılacak zemin araştırmaları, özellikle depreme dayanıklı yapı tasarımı için büyük öneme sahiptir. Arazi kullanım planlamalarına yönelik olarak yapılan araştırmalarda, zemin özelliklerinin ve analiz sonuçlarının bölgeleme haritaları ile sunulması, yerleşim açısından riskli ve güvenli bölgelerin ortaya konmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, Kocaeli ili Kandıra İlçesi kıyı şeridinde yer alan bir bölgenin zemin özellikleri, jeolojik, jeofizik ve geoteknik çalışma sonuçları ile incelenerek amaca yönelik olarak hazırlanan bölgeleme haritaları ile yerleşime uygunluk durumu değerlendirilmiştir. Bölgedeki hakim jeolojik birim genel olarak Kuvaterner yaşlı alüvyon olup, deniz kenarındaki yamaçlarda ise Üst Kretase yaşlı Akveren Formasyonuna ait mikritik kireçtaşları görülmektedir. İnceleme alanında yerleşime uygunluğun değerlendirilmesi amacıyla 13 adet sondaj, 15 adet sismik kırılma, 10 adet MASW, 7 adet mikrotremor çalışması ve laboratuvar deneylerine ait sonuçlardan yararlanılmıştır. Alüvyon kesimlerde zemin sınıfları Z4 olarak belirlenirken, kireçtaşlarının bulunduğu alanlarda ise zemin sınıfı Z2 olarak belirlenmiştir. Kaya birimler için yapılan nokta yükü deneylerine göre, bölgedeki kireçtaşlarının düşük ile orta arasında dayanım değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. İnceleme alanının doğu ve batısında yer alan tepelik bölgelerde Akveren Formasyonuna ait alanların eğiminin % 40'ın üzerinde olması ve kireçtaşlarında karstik boşluklar bulunmasından dolayı bu alanlar yerleşime uygun değildir.

**Anahtar Kelimeler:** Kandıra, zemin araştırması, yerleşime uygunluk, geoteknik, bölgeleme haritası

## Investigation of the soil characteristics for coastal zone land-use planning, Kandıra, Izmit

### ABSTRACT

It is necessary to perform detailed soil investigations for reliable constructions in settlement areas which have a suitable topography for natural disasters such as earthquake, landslide etc. The regional and parcel-based ground surveys have great importance especially for the earthquake resistant building design in new

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Mersin Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Mersin – [fkurnaz@mersin.edu.tr](mailto:fkurnaz@mersin.edu.tr)

settlement areas and the revision of the existing settlement areas. Presentation of soil properties and analysis results with zoning maps in the surveys for land use planning, contributes to the determination of risky and safe areas in terms of settlement. In this study, the soil characteristics of the study area were investigated by geological, geophysical and geotechnical studies results and the settlement suitability was evaluated with the zonation maps. The dominant geological unit in the region is Quaternary aged alluvium and on the hillsides near the seaside are covered by Upper Cretaceous aged micritic limestones belonging to Akveren Formation. 13 drilling, 15 seismic refraction, 10 MASW, 7 mikrotremor studies and results of the laboratory tests have been used for the evaluation of the soil properties in the study area. The local soil classes were determined as Z4 in the alluvium and Z2 in the limestones. The limestone strengths in the region were determined as low and middle. The hilly areas located in the west and east of the study area belonging to Akveren Formation have karstic cavities and 40% slope. These areas are not suitable for settlement.

**Keywords:** Kandıra, soil investigation, settlement suitability, geotechnic, zonation map

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yerleşim alanlarının planlamalarında yerel zemin özelliklerinin durumu göz önünde bulundurularak yapılaşmaya gidilmesi oldukça büyük önem taşımaktadır. Özellikle dünyanın farklı bölgelerinde meydana gelen büyük depremlerde yaşanan ağır kayıplar ve zararlar, deprem bilincinin ve olası depremlere karşı alınacak önlemler konusundaki duyarlılığın gelişmesine vesile olmuştur. Bir yerleşim alanı için deprem tehlikesinin belirlenmesinde yerel zemin koşullarının etkisi, en az deprem büyüklüğü ya da depremin odak noktasına olan uzaklığı kadar önemlidir. Deprem olduğu andan itibaren yer içinde hızla yayılan sismik dalgalar, gevşek zemin ortamlarına ulaştığı anda, dalga genliklerinde meydana gelen artışlardan ötürü ciddi yer sarsıntularına ve yapısal hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, deprem riski yüksek olan bölgelerde yerel zemin koşullarının detaylı olarak araştırılması, depreme dayanıklı yapı tasarımının gelişmesi ve meydana gelebilecek hasarların en aza indirilmesi açısından büyük öneme sahiptir.

Dünya genelinde yerleşim alanları için arazi planlamasını etkileyen faktörler vardır. Bu faktörler, bölgesel ve yerel jeoloji, bölgenin sismolojik durumu, yeraltı ve yerüstü suları, arazinin topoğrafik durumu, yerel zemin karakteristikleri, iklim şartları şeklinde sıralanabilir. Tüm bu faktörler göz önünde tutularak yapılan planlamalar yerleşim alanları için ekonomik, sosyolojik ve çevresel faydalar sağlayacaktır. Yerleşim alanlarının arazi planlaması, amaca yönelik saha ve laboratuvar

çalışmaları, bu çalışmalardan elde edilen verilerin toplanması, depolanması ve analizi, mevcut ya da olabilecek problemlere karşı uygulanabilir proje önerilerin tanımlanması süreçlerini içerir [1, 2]. Bu süreçlerin her aşamasında büyük hacimli veri tabanları kullanılmakta ve bunlarla ilgili farklı türden analizler yapılmaktadır. Bu gibi çalışmalarda Coğrafi Bilgi Sistemleri'nden (CBS) yararlanmak büyük faydalar sağlamaktadır [3]. CBS, çalışmada kullanılacak tüm verilerin istenildiği şekilde sayısal ortama aktarılması, depolanması, analiz edilmesi ve gerektiğinde veriler üzerinde sorgulamalar yapılabilmesine olanak sağlamaktadır [4]. CBS'nin oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. CBS kullanımı ile coğrafi koordinatı olan her türden veri grubu ile ilgili analiz, sorgulama ve haritalama yapılabilmektedir.

Bir bölgede uygun yerleşim alanlarını belirlemek, güvenli binalar yapmak ve yaşam güvenliğini sağlamak için deprem tehlikesinin belirlenmesi gereklidir. Bu amaçla, son yıllarda, depremlerle birlikte oluşabilecek yıkıcı dinamik kuvvetler, yüzey faylanması, zemin büyütmesi, sıvılaşma ve toprak kayması gibi doğal olayların etkilerini azaltmak için mikrobölgeleme ya da diğer bir adıyla sismik mikrobölgeleme çalışmaları yapılmaktadır. Mikrobölgeleme, sismik tehlike ve risk değerlendirmelerinde en yaygın kabul gören tekniklerden biri olup sismik etkiye maruz kalan bölgelerde zemin davranışı etkilerinin değişimi olarak tanımlanabilir [5]. Bu çalışmalar öncelikli olarak, kent planlaması ve arazi kullanım amaçlı parametrelerin belirlenmesini hedeflemektedir.

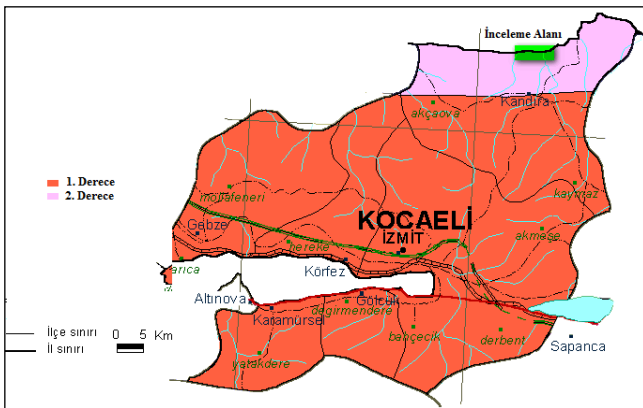
Bu çalışmada Kocaeli ili Kandıra İlçesi kıyı şeridinde bulunan bir bölgenin yerel zemin



koşulları detaylı olarak incelemiştir. Çalışma alanındaki yerel zemin özellikleri, jeolojik, jeofizik ve geoteknik yöntemlere ait araştırma sonuçları ile irdelenerek bölgenin yerleşime uygunluk durumu değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda bölgede yapılmış olan sondaj, sismik kırılma, MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), mikrotremor gibi arazi çalışmaları ile zemin ve kaya numunelerine ait laboratuvar deney sonuçları kullanılmıştır. Çalışma alanında yerleşim planlarını etkileyebilecek zemin parametreleri ile yerleşime uygunluk durumu ise bölgeleme haritaları ile sunulmuştur.

## 2. İNCELEME ALANI (THE STUDY AREA)

İnceleme alanı Kocaeli İli, Kandıra İlçesi, Sarısu kıyı yerleşkesini kapsamaktadır. İzmit merkezinin kuzeyinde bulunan çalışma alanının güneyinde Kandıra İlçesi, kuzeyinde Karadeniz, batısında Bağıranlı Köyü, doğusunda ise Kerpe Köyü yer almaktadır. İnceleme alanında eğim değerleri alüvyon kesimlerde genelde %0-10 arasında gözlenirken, özellikle kuzey doğu ve kuzey batıda yer alan yamaçlarda %10-40 arasında değiştiği hatta yer yer daha da arttığı belirlenmiştir. İnceleme alanı, Türkiye Deprem Bölgeleri haritasına göre ikinci derecede deprem bölgesi olmakla birlikte Kuzey Anadolu Fay Zonu'na (KAFZ) olan yakınlığı ve konum olarak sahil şeridinde yer alması göz önüne alındığında, söz konusu kıyı bölgesi için arazi kullanım planlaması önem arz etmektedir (Şekil 1).

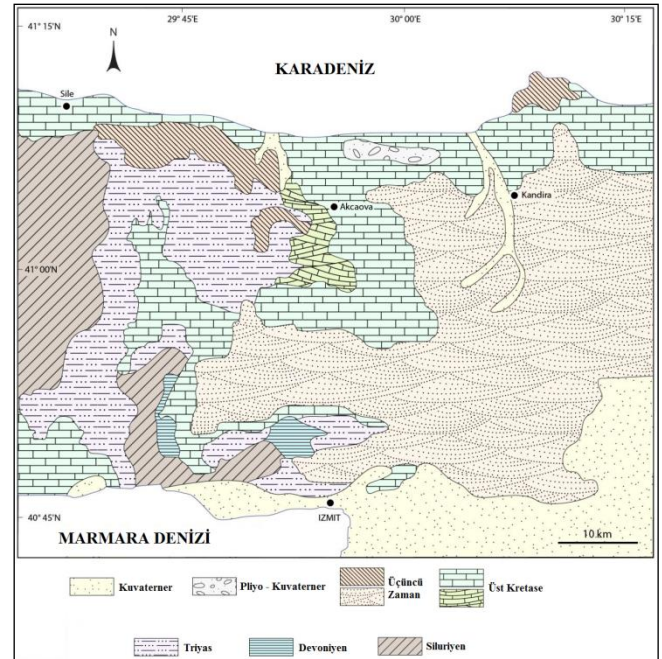


Şekil 1. İnceleme alanının konumunu ve deprem tehlikesini gösteren yerbulduru haritası (The location and earthquake hazard map of the study area) [6].

### 2.1. İnceleme Alanı ve Çevresinin Jeolojisi (Geology of the Study Area and Surroundings)

İnceleme alanı ve çevresini içine alan bölgenin jeoloji haritası Şekil 2' de verilmektedir [7, 8].

Bölgede Siluriyen dönemine ait kayaçlar Şile'nin güneyi ve güneybatısında geniş bir yayılım gösterirken İzmit'in kuzeybatısında daha dar bir alanda görünmektedirler. Şile İlçesinin güneyinde ve İzmit'in kuzeybatısında gözlenen kayaçlar genelde arkoz, grovak, kumtaşı, kuvarsit ve kayraktır. Devoniyen dönemine ait grovak, kumtaşı ve kireçtaşı mostraları ise İzmit'in kuzey ve kuzeybatısında dar ve sınırlı bir alanda bulunmaktadır. Triyas kayaçları, İzmit Körfezi'nin kuzeyinde, çeşitli tabakalı kumtaşı, konglomera, marn, dolomit, şeyl ve yumru kireçtaşlarından oluşmaktadır. Geniş bir yayılıma sahip olan Üst Kretase yaşlı kayaçlar ise Kandıra İlçesi'nin batı, kuzey ve kuzeybatısında, Şile İlçesi çevresinde ve İzmit'in kuzey, kuzeydoğu ve uzak kuzeybatısında görülmektedir. Bu kayaç istiflenmesinde, Akveren Formasyonu, Triyasik dönemine ait kayaçlar üzerine uyumsuz olarak gelmektedir ve bazaltik bir konglomera ile diğerlerinden ayrılmaktadır. Bu formasyon, bej-beyaz kireçtaşları, ufalanabilir ve kırılğan killi kireçtaşları ve marn, konglomera, volkanik ara katkılı kumtaşı, sarı renkli mikritik kireçtaşları içermektedir [8, 9].



Şekil 2. İnceleme alanı ve çevresinin jeoloji haritası (The geological map of the study area and its surroundings) [7, 8].

İnceleme alanında ve yakın çevresinde ise Kuvaterner yaşlı alüvyon birimler hakimdir. Alüvyon birimler genelde grimsi yeşil renkli kum ve killerden oluşmaktadır. Diğer kısımlarda ve deniz kenarındaki yamaçlarda ise Üst Kretase yaşlı Akveren Formasyonuna ait gri-bej renkli mikritik kireçtaşları bulunmaktadır. Bunlar genellikle düzenli ve orta tabakalıdır. İnceleme alanında

yüzeje yakın sığ seviyelerde ise bozunma ürünü killi – siltli birimler görülmektedir. Ayrıca kireçtaşlarında karstik boşluklar da tespit edilmiştir.

### 3. İNCELEME ALANININ GEOTEKNİK ÖZELLİKLERİ (GEOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREA)

İnceleme alanında geoteknik özelliklerin belirlenmesinde, bölgede yapılan 13 adet sondaj çalışmaları ve sondajlardan elde edilen numunelere ait laboratuvar deney sonuçlarından yararlanılmıştır. Derinlikleri 9 ile 20 m arasında değişen sondaj kuyularında kesilen birimler genellikle alüvyon ve Akveren Formasyonuna ait kireçtaşı ile bozunma ürünü killi - siltli seviyelerdir. Alüvyon kalınlığı, yapılan sondaj çalışmalarında, en kalın yerinde 20,00 m olarak tespit edilmiştir. Tablo 1’de ilk 5 sondaja ait litolojik bilgilere yer verilmiştir. Diğer sondajlarda da litolojik özellikler benzer karakterdedir.

Tablo 1. Sondaj Çalışmalarından Elde Edilen Litolojik Özellikler (Lithological Properties Obtained from Drilling Applications)

SK No	Derinlik	Litoloji	Formasyon
SK 1	0,00 – 8,50 m	Mavimsi Gri Renkli Kil Kum Ardalanması	Alüvyon
	8,50 – 10,50 m	Blok Gri Bej Renkli Kireçtaşı	
	10,50 – 20,00 m	Mavimsi Gri Renkli Kil Kum Ardalanması	
SK 2	0,00 – 15,00 m	Mavimsi Gri renkli Kum	Alüvyon
	15,00 – 20,00 m	Mavimsi Gri renkli Kil	
SK 3	0,00 – 10,50 m	Kahverengi Siltli Kumlu Kil	Akveren Formasyonu
	10,50 – 13,50 m	Gri Bej Renkli Kireçtaşı	
SK 4	0,00 – 1,70 m	Kahverengi Killi Kum	Akveren Formasyonu
	1,70 – 9,00 m	Gri Bej Renkli Kireçtaşı	
SK 5	0,00 – 12,00 m	Mavimsi Gri renkli Kum	Alüvyon
	12,00 – 20,00 m	Mavimsi Gri renkli Kil	

İnceleme alanında yapılan sondajlar sırasında alınan zemin numunelerine ait laboratuvar sonuçları incelendiğinde, bölgede genellikle ince taneli zeminlerin hakim olduğu görülmektedir.

Zemin sınıfları ağırlıklı olarak yüksek ve düşük plastisiteli kil (CH – CL) olmakla birlikte yer yer siltli kumlara (SM) ve az da olsa yüksek ve düşük plastisiteli siltlere de (MH – ML) rastlanmaktadır. Alüvyona ait kil birimlerin rengi üstte kahverengi, altta yeşilimsi gri renkli, Akveren Formasyonuna ait killerin rengi ise kızıl kahvedir. Alüvyona ait killerin kıvamlilik indisi  $I_c$ , 0,25 - 1,14 arasında değişmekte olup Ulusay, 2001’e [10] göre kıvamı çok yumuşak – yumuşak – yarı sert – sert – yarı katı, Akveren Formasyonuna ait killerin kıvamlilik indisi  $I_c$  ise 0,80 - 1,20 arasında değişmekte olup kıvamı sert – yarı katıdır. Plastisite İndisleri (PI) ise alüvyonda 17 – 46 arasında değişmekte olup Burmister,1951’ e [11] göre orta – yüksek – çok yüksek plastisiteli, Akveren Formasyonunda ise (PI), 19 – 52 arasında değişmekte olup orta – yüksek – çok yüksek plastisitelidir.

Örselenmemiş numuneler üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyi sonuçlarına göre alüvyonda kohezyon (c) değerleri 0,35 – 0,64 kg/cm<sup>2</sup>, içsel sürtünme açısı ( $\Phi$ ) değerleri ise 2<sup>o</sup> – 4<sup>o</sup> olarak belirlenmiştir. Akveren Formasyonuna ait kesimlerde ise kohezyon (c) değerleri 0,29 – 0,96 kg/cm<sup>2</sup>, içsel sürtünme açısı ( $\Phi$ ) değerleri ise 2<sup>o</sup> – 5<sup>o</sup> arasında olarak belirlenmiştir. Tablo 2’de bazı örselenmemiş numunelere ait üç eksenli basınç deneyi sonuçları görülmektedir.

Tablo 2. Üç Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları (Three Axial Pressure Test Results)

Sondaj No	Numune Tipi	Derinlik (m)	Üç Eksenli Basınç (UU)		Formasyon
			c (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Phi$ (°)	
SK 2	UD	2,50	0,35	2	Alüvyon
SK 3	UD	2,50	0,50	3	Alüvyon
SK 5	UD	2,50	0,42	3	Alüvyon
SK 7	UD	2,50	0,64	4	Alüvyon
SK 10	UD	2,50	0,29	2	Akveren Fm
SK 12	UD	2,50	0,96	5	Akveren Fm

Yapılan sondajlarda her 1.5 m de zeminlerin sıklık derecesinin tespitine yönelik olarak SPT (Standart Penetrasyon Testi) deneyi uygulanmıştır. SPT darbe sayılarının alüvyon birimdeki killi - siltli seviyelerde 2 ile 20 arasında değişmekte birlikte kumlu seviyelerde genelde 20 ile 30 arasında değiştiği görülmüştür. Akveren Formasyonuna ait birimlerde ise genelde 20 ile 50 arasında değişen SPT darbe sayıları mevcuttur.

İnceleme alanında Akveren Formasyona ait kireçtaşlarının rengi gri-bej renklidir. Akveren Formasyonuna ait kireçtaşları üzerinde yapılan

nokta yükü dayanım deneyi sonuçlarına göre dayanım değerleri ( $I_s$ ), 10 – 27 kg/cm<sup>2</sup> arasında değişmekte olup Bieniawski, 1975'e [12] göre düşük – orta dayanımlıdır. Bazı kayaç numunelerine ait nokta yükü dayanım deneyi sonuçları Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 3. Kireçtaşı Örnekleri Üzerinde Yapılan Nokta Yükü Deneyi Sonuçları (Point Load Test Results on Limestone Samples)

Sondaj No	Numune Tipi	Derinlik (m)	Nokta Yükü $I_s$ ,kg/cm <sup>2</sup>
SK 3	CR	11,40	27,60
SK 3	CR	12,20	20,50
SK 4	CR	5,90	20,70
SK 4	CR	7,00	20,10
SK 4	CR	7,50	23,40
SK 8	CR	18,80	20,40
SK 8	CR	19,80	17,00
SK 9	CR	4,30	16,90
SK 9	CR	4,50	10,10
SK 10	CR	5,90	23,10
SK 10	CR	17,60	10,00

#### 4. İNCELEME ALANININ JEOFİZİKSEL ÖZELLİKLERİ (GEOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE STUDY AREA)

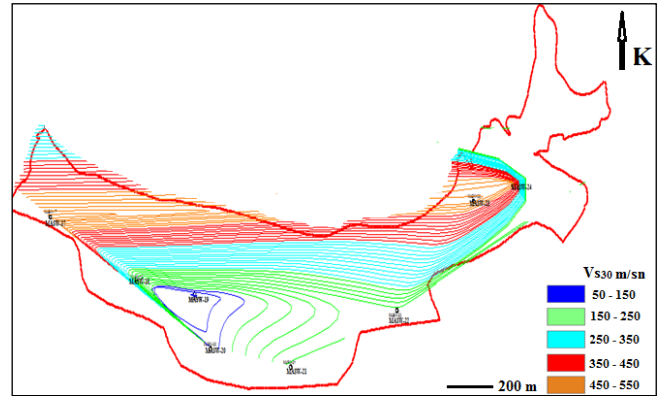
Çalışma alanındaki zeminlerin jeofiziksel özelliklerinin belirlenmesinde 15 adet sismik kırılma ölçümü, 10 adet MASW ölçümü ve 7 adet mikrotremor ölçümüne ait arazi çalışma sonuçlarından yararlanılmıştır. Bu ölçümlere bağlı olarak tabaka kalınlıkları, yer altı hız yapısı, zeminlerin dinamik-elastik mühendislik parametreleri, zemin hakim titreşim periyotları ve zemin büyütme belirlenmiştir. Tablo 4'de 15 profilde alınan sismik kırılma ölçüm sonuçlarına ait bilgiler yer almaktadır. Çalışma alanında sismik ölçümlerle belirlenen 1. Tabaka kalınlıkları genelde 3 ile 10 m arasında değişmekte olup bu seviyeler için yıkıcı deprem dalgası olarak bilinen S dalga hızları ( $V_s$ ), 196 – 436 m/sn arasında değişmektedir. İkinci tabakada ise  $V_s$  hızları 335 - 807 m/sn arasında değerler almaktadır.

İnceleme alanında kayma dalgası hızlarının ilk 30 m derinlikteki değişiminin tespiti için MASW ölçüm yöntemi sonuçları kullanılmıştır. MASW yönteminde veri toplama işlemi, arazi düzeni ve ölçü alımı, sismik kırılma yöntemiyle benzerlik göstermekle birlikte sismik kırılmada tabaka hız bilgileri elde edilebilirken, MASW yönteminde

Tablo 4. Sismik Kırılma Ölçümleri Sonucu Elde Edilen Dinamik Elastik Özellikler (Dynamic Elastic Properties Obtained from Seismic Measurements)

Tabaka No	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	h (m) (kalınlık)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$V_p/V_s$	$\nu$	$G_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_d$ (kg/cm <sup>2</sup> )	K (kg/cm <sup>2</sup> )	$q_u$ (kg/cm <sup>2</sup> )
-----------	-------------	-------------	------------------	------------------------------	-----------	-------	---------------------------------	-----------------------------	-------------------------	-----------------------------

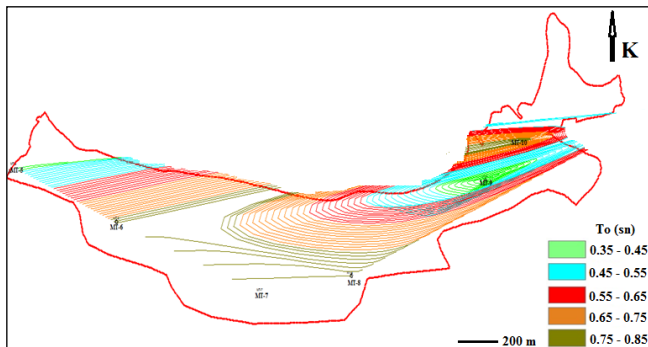
derinliğe bağlı  $V_s$  hızı değişimleri belirlenebilmektedir [13]. Ayrıca, deprem riski taşıyan bölgelerde uygulanan afet yönetmeliğinde, zemin sınıflarının belirlenmesinde ilk 30 m derinliğe ait ortalama kayma dalgası hızı bilgisi ( $V_{s30}$ ) gereksinimi vardır. İnceleme alanında yapılan MASW ölçümleri sonucu elde edilen  $V_{s30}$  değerleri 130 – 517 m/sn arasında değişmekte olup, belirlenen  $V_{s30}$  değerlerinin çalışma alanındaki değişimi Şekil 3'de verilen haritada görülmektedir.



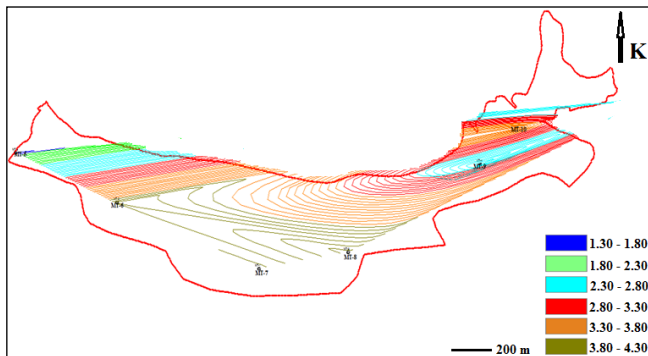
Şekil 3. İnceleme alanına ait  $V_{s30}$  haritası ( $V_{s30}$  map of the study area)

İnceleme alanında zemin hakim titreşim periyotları ve zemin büyütmelerinin belirlenmesinde ise 7 noktada uygulanmış olan, yer yüzeyindeki zayıf ve düşük genlikli titreşimlerin ölçüldüğü mikrotremor yöntemi sonuçlarından yararlanılmıştır. İnceleme alanında hakim periyotlar  $T_0$ , 0,36 – 0,83 sn aralığında, zemin büyütme belirlenmesinde ise 1,67 – 4,12 arasında değişmektedir. Afet bölgelerinde yapılacak yapılar hakkındaki yönetmelik [14] uyarınca zemin hakim titreşim periyodu değerleri kullanılarak belirlenen yerel zemin sınıflarına göre inceleme alanında alüvyon ile temsil edilen alanlar Z4, Akveren Formasyonuna ait alanlar ise Z2 sınıfına girmektedir. Mikrotremor ölçümleri sonucu elde edilen zemin hakim titreşim periyodu ve zemin büyütme değerlerinin inceleme alanındaki değişimi, sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'de verilen haritalarda görülmektedir. Hakim periyotların yüksek çıktığı Z4 sınıfı alanlarda büyütme değerlerinin de 4 civarında olduğu, tehlike düzeyi olarak orta – yüksek tehlike arz ettiği göze çarpmaktadır.

SERİM NO												
SİS1	1	500	205	3,91	1,47	2,4	0,399	616	1724	2843	3,01	
	2	901	412		1,70	2,2	0,368	2883	7887	9944	7,00	
SİS2	1	551	275	4,90	1,50	2,0	0,334	1136	3031	3045	4,13	
	2	1103	537		1,79	2,1	0,345	5152	13855	14866	9,59	
SİS3	1	563	361	6,43	1,51	1,6	0,151	1968	4530	2162	5,45	
	2	1015	782		1,75	1,3	0,230	10700	16473	3760	13,68	
SİS4	1	607	393	7,14	1,54	1,5	0,139	2377	5414	2501	6,05	
	2	991	648		1,74	1,5	0,127	7303	16455	7344	11,27	
SİS5	1	595	370	11,74	1,53	1,6	0,185	2096	4966	2626	5,66	
	2	1486	674		1,92	2,2	0,370	8744	23966	30843	12,97	
SİS6	1	530	196	5,49	1,49	2,7	0,421	571	1624	3416	1,08	
	2	1327	375		1,87	3,5	0,457	2631	7665	29439	7,02	
SİS7	1	500	199	8,39	1,47	2,5	0,406	581	1632	2891	2,92	
	2	995	399		1,74	2,5	0,404	2772	7784	13541	6,95	
SİS8	1	446	205	10,16	1,42	2,2	0,366	599	1636	2036	2,92	
	2	1711	335		1,99	5,1	0,480	2238	6623	55385	6,68	
SİS9	1	467	255	3,63	1,44	1,8	0,288	937	2413	1893	3,67	
	2	1071	568		1,77	1,9	0,304	5721	14925	12713	10,07	
SİS10	1	509	255	4,77	1,47	2,0	0,332	957	2552	3538	3,75	
	2	1213	445		1,83	2,7	0,422	3623	10305	22088	8,14	
SİS11	1	584	368	3,60	1,52	1,6	0,171	2064	4832	2446	5,61	
	2	999	807		1,74	1,2	0,439	11350	12733	2260	14,06	
SİS12	1	531	211	6,17	1,49	2,5	0,406	663	1863	3313	3,14	
	2	1239	420		1,84	3,0	0,435	3244	9312	23908	7,72	
SİS13	1	643	249	3,94	1,56	2,6	0,412	968	2733	5164	3,89	
	2	1017	499		1,75	2,0	0,341	4359	11695	12294	8,74	
SİS14	1	430	436	6,91	1,41	1,0	0,180	2684	106227	968	6,15	
	2	1409	794		1,90	1,8	0,267	11974	30350	21741	15,08	
SİS15	1	673	311	9,69	1,58	2,2	0,364	1527	4167	5115	4,91	
	2	1358	653		1,88	2,1	0,350	8024	21660	24005	12,29	



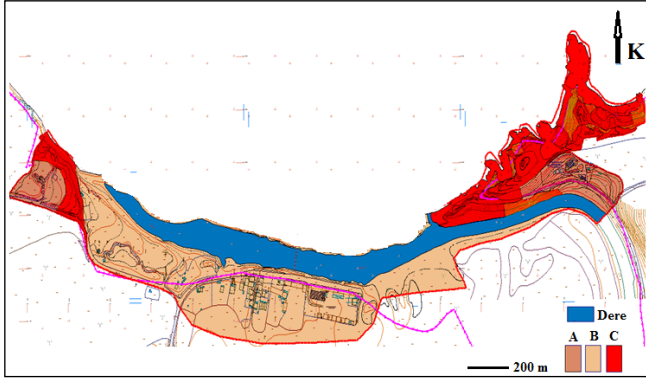
Şekil 4. İnceleme alanına ait zemin hakim titreşim periyodu haritası (Characteristic site period map of the study area)



Şekil 5. İnceleme alanına ait zemin büyütme haritası (Soil amplification map of the study area)

## 5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR (EVALUATIONS AND CONCLUSIONS)

Bu çalışmada jeolojik, jeofizik ve geoteknik verilerin birlikte kullanımı ile Kocaeli ili Kandıra İlçesi kıyı şeridinde yer alan bir bölgenin zemin özellikleri incelenerek çalışma alanının yerleşime uygunluğu araştırılmıştır. Yapılan arazi ve laboratuvar çalışmalarına ait sonuçlar irdelenerek, inceleme alanı içinde, doğal afet tehlikeleri ve/veya jeolojik - geoteknik özellikler nedeniyle yerleşime uygunluğu etkileyebilecek unsurlar değerlendirilmiştir. Bu çerçevede inceleme alanı, yerleşim açısından düşük, orta ve yüksek tehlikeli olmak üzere üç bölgeye ayrılmıştır (A, B, C). Şekil 6 da inceleme alanında yerleşim açısından tehlike düzeylerinin gösteren bölgeleme haritası görülmektedir.



Şekil 6. İnceleme alanında yerleşime uygunluk için bölgeleme haritası; A: düşük tehlike, B: orta tehlike, C: yüksek tehlike (Zoning map for settlement suitability in the study area; A: low hazard, B: medium hazard, C: high hazard)

Düşük tehlikeli olarak değerlendirilen alanlar (A); inceleme alanında Akveren Formasyonu ile temsil edilen kireçtaşlarının hakim olduğu kesimlerdir. Arazi ve laboratuvar çalışmaları ile belirlenen mekanik ve dinamik özellikler göz önüne alındığında ve diğer alanlarla kıyaslandığında, bu kesimlerin yapılaşma açısından daha uygun yerel zemin koşullarına sahip olduğu söylenebilir. Bununla birlikte eğim derecesinin 10%'u geçtiği kesimlerde muhtemel stabilite sorunları için tedbir alınması yararlı olacaktır. Yerleşim açısından orta düzeyde tehlikeli alanlar (B), inceleme alanında eğim derecelerinin 0-10% arasında değiştiği alüvyon ile temsil edilen alanlardır. Yüksek plastisiteli killer ve gevşek kumların hakimiyeti altında olan bu kesimlerde SPT değerleri 5 – 15,  $V_{s30}$  değerleri 100 - 200 m/sn, zemin büyütme hızları ise 2 - 4 arasında değişmektedir. Bu alanlarda yapılaşmaya gidilirken yüksek plastisiteli killer için muhtemel şişme ve oturma problemleri, gevşek kumlar için ise muhtemel sıvılaşma problemlerine karşı gerekli önlemlerin alınmasında yarar vardır. Yüksek tehlikeli olarak değerlendirilen alanlar (C) ise inceleme alanının kuzeydoğu ve kuzeybatısında, Akveren Formasyonuna ait ve eğimin % 40'ın üzerinde olduğu tepelik bölgelerdir. Kireçtaşları ile temsil edilen bu kesimler, Karadeniz'e sınır konumunda olup yer yer karstik boşluklar da içermektedir. Bu kesimler yerleşime uygun değildir.



#### TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmanın hazırlanmasında verilerin temini için destek veren Tömekçe İnşaat'a ve yardımcıları için Muhammed Yüce'ye teşekkür ederim.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] M. Costa Lobo, J. Mesones, A. Dal Cin, T. Franchini and J. Lourenzo, "Risk in planning a new paradigm. Risk Assessment and Management: Planning for Uncertain Future, 33rd World Planning Cong., September, Ogaki, Japan, pp. 17-18. pp. 103-107, 1997.
- [2] B. S. Şengezer, "Afet Etkilerinin Azaltılması Hedefinin Planlamada Önemi ve Rolü", Kentleşme ve Jeoloji Sempozyumu, İstanbul, pp. 17-26, 1998.
- [3] H. Demir, "Küçükçekmece-Halkalı Yerleşim Bölgesinin Yerel Zemin Koşullarına Göre Depremselliğinin İncelenmesi", Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 2006.
- [4] P. A. Burrough, "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment", Oxford University Press, 2. ed., 1998.
- [5] S. Sharma and W. D. Kovaks, "Microzonation of the Memphis, Tennessee area", A report on research sponsored by The U.S.G.S., No:14-08-0001-17752, 1980.
- [6] T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (Bayındırlık ve İskan Bakanlığı), Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası, 1996.
- [7] Z. Ternek, C. Erentoz, H. N. Pamir, "Explanatory text of the geological map of Turkey- Istanbul Sheet", Mineral Research and Exploration, 1987.
- [8] S. Ramazanoglu, A. El Saiy, O. Abdelghany, H. Arman, "Structural, petrographic and mineralogical characteristics and diagenetic aspects of Kandıra stone from Northwestern Turkey", Scientific Research and Essays Vol. 7(4), pp. 460-467, 2012.
- [9] S. Ramazanoglu, A. Akinci, H. Arman, "Chemical and micro structural properties of Kandıra Stone", Kocaeli University, Mag. Appl. Geosci., 6: 100-108, 2006.
- [10] R. Ulusay, "Uygulamalı Geoteknik Bilgileri", TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları:38, Genelleştirilmiş 4. Baskı, Ankara, 381s., 2001.

- [11] D. M. Burmister, "Identification and classification of soil An appraisal and statement of principles", ASTM STP 113, Amer. Soc. for Test and Mat., Philadelphia, 1951.
- [12] Z. T. Bieniawski, "The point-load test in geotechnical practice", Engineering Geology, 9, 111-120, 1975.
- [13] C. B. Park, R. D. Miller, & J. Xia, "Multichannel analysis of surface waves", Geophysics, 64 (3), 800-808, 1999.
- [14] ABYYHY, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, İMO İzmir Şubesi Yayını, No: 25, 1998.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 01-04-2016 <u>Kabul/Accepted</u> 03-04-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.339860	

## Serbest formlu yüzeylerde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisinin taguchi metodu ile optimizasyonu

Harun Yaka\*<sup>1</sup>, Halil Demir<sup>2</sup>, Arif Gök<sup>3</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada, Al 7075-T6 malzemesi üzerinde serbest formlu yüzeyler CNC freze tezgâhında işlenmiş ve en iyi yüzey pürüzlülüğünü elde ettiğimiz kesme şartları belirlenmiştir. Bunun için, kesme hızı, ilerleme, yanal adım ve işleme yöntemlerine göre Taguchi L<sub>16</sub> deney tasarımı ile deney listesi oluşturulmuştur. Bu deneyler sonucu ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerleri ölçülmüştür. Taguchi tasarımında sinyal-gürültü oranı tespit edilmiş ve deneysel sonuçlara göre, dört faktör arasında Ra'ya en önemli etkiyi yanal adımın yaptığı elde edilmiştir. Varyans analizinde yanal adımın Ra değerinde %95 güven düzeyinde etki ettiği bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Al 7075-T6, Kesme parametresi, Taguchi Metodu, Yüzey pürüzlülüğü

## Optimization of the cutting parameters effect to surface roughness with taguchi method in free form surface

### ABSTRACT

In this study, the free form surfaces were processed on Al 7075-T6 material in CNC milling machine and cutting conditions were determined that we get the best surface roughness. Therefore, experiment list was created with Taguchi L<sub>16</sub> experimental design according to cutting speed, feed rate, step over, and machining strategy. At the end of these experiments, the average surface roughness (Ra) were measured. In Taguchi design, signal-to-noise ratio has been determined and according to the experiment results, step over was obtained as the most important effect to Ra among the four factors. In Variance analysis, step over was found the 95% confidence level in Ra value.

**Keywords:** Al 7075-T6, Cutting parameters, Taguchi Method, Surface Roughness

\*<sup>1</sup> Harun YAKA Tel: +90544 297 3329 E-mail: harunyaka@gmail.com

<sup>2</sup> Halil DEMİR

<sup>3</sup> Arif GÖK

## 1. GİRİŞ

Günden güne artan üretim alanlarında talaşlı imalat sıklıkla kullanılan bir metottür [1]. Talaşlı üretimin fazla kullanılmasının sebebi, işleme parametrelerinin optimize edilerek en uygun parametrelerin seçilebildiği için üretilen parçaların ölçü tamlığı ve yüzey kalitesi daha iyi oranlarda elde edilebilmektedir. bundan dolayı bu konu üzerinde birçok bilimsel çalışma yapılmıştır [2]. Son zamanlarda serbest formlu yüzeyler endüstrinin farklı dallarında sıklıkla kullanılmaktadır [3]. Örneğin kalıp üretiminde, hassas makine imalat endüstrilerinde, uzay ve uçak endüstrisinde, otomotiv endüstrisi ve biyomedikal cihazların üretimi gibi alanlarda yaygın olarak görülmektedir [4] [5].

Seri üretimin temel amacı düşük maliyetle ve kısa sürede yüksek kaliteli ürünler üretmektir [6]. Otomasyon ve imalat sistemleri kombinasyonu bu amaç doğrultusunda kullanılabilir [7]. Hem kısa sürede ve düşük maliyetle üretim gerçekleştirirken hemde yüksek yüzey kaliteyi sağlamak için bilgisayar kontrollü (CNC) tezgahlar kullanılmaktadır [8].

Üretim maliyetlerini düşürmek ve en optimum yüzey kalitesini sağlamak için malzemenin, uygun parametre seviyeleri kullanılarak işlenmesi önemlidir [9]. Bu işleme parametrelerinin uygun seçilmesi ve aralarındaki etkileşimlerin deneysel çalışmalarla incelenmesi imalat alanında büyük önem arz etmektedir [10]. İşleme yöntemi, seçilen malzeme, kesici takımın türü, fiziksel, kimyasal ve ısıl etkenler, işleme esnasında kullanılan soğutucu, kesici takım ve işlenen malzeme arasındaki mekanik hareketler yüzey kalitesini etkileyen parametrelerdir [11]. Kaliteli işlenmiş bir yüzey yorulma mukavemetinde, korozyon direncinde ve sürtünme ömründe önemli derecede iyileştirme sağlamaktadır. Deneyler sırasında ölçüm yapılırken ölçü aletlerinin kalibrasyonunun gerçekleştirilmesi ölçü tamlığı açısından önemlidir. Deney sonuçlarının elde edilmesi kadar önemli bir konuda yorumlanmasıdır [12]. Araştırmacıların amaçları tasarımda, imalatta veya bakım çalışmalarında en ideal değerleri bulmaktır. Bunun için yapılan çalışmalarda optimum değeri bulmak için matematiksel programlama metotları yaygın olarak kullanılmaktadır [13]. Taguchi, regresyon modelleri, yüzey cevap metodu, yapay sinir ağları gibi yöntemler karar verme

aşamasında araştırmacılara yardımcı olmaktadır [14].

Taguchi yöntemi, üretim maliyetlerini düşürme özelliğine sahip olan, üretim miktarını arttıran ve zamandan tasarruf sağlayan bir problem çözme aracıdır. Böylelikle üretimde verimliliği elde etmemize yardımcı olmaktadır [15]. Bu yöntem, üretimde maliyeti düşürerek zamandan tasarruf sağlayan, verimliliği en optimum düzeye çıkarmak için en etkili parametreleri seçerek deneysel ve analitik kavramları birleştirir. Bunu elde etmek için Taguchi yöntemi, bütün prosesi içerisine alarak ve deney sayısını azaltarak en uygun yöntemi belirlemek için özel ortogonal dizilerden yararlanır [16].

Yapılan bu çalışmada, AL 7075-T6 malzemesi üzerinde işlenen serbest formlu yüzeylerde işleme sonucunda oluşan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri deneysel olarak ölçülmüştür. Deney tasarımı olarak Taguchi L<sub>16</sub> tasarım kullanılmıştır. Taguchi analizi ile optimum kesme parametreleri belirlenmiştir. Ulaşılan sonuçlar memnuniyet vericidir.

## 2. MATERYAL VE METOT

Çok düşük yoğunluğuyla hafif bir metal olan, yüzeyinde oluşan oksit filmi sayesinde korozyona karşı dirençli, yüksek mukavemete ve işlenebilirliğe sahip olan Al7075-T6 serisi malzemeler bu özelliklerinden dolayı otomotiv, uçak ve gemi sanayiinde ve askeri amaçlı hafif zırhlı araçlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Deneylerde kullandığımız Al7075-T6 malzemesinin mekanik ve kimyasal özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. a- Malzemenin mekanik özelliği, b- Malzemenin kimyasal özelliği

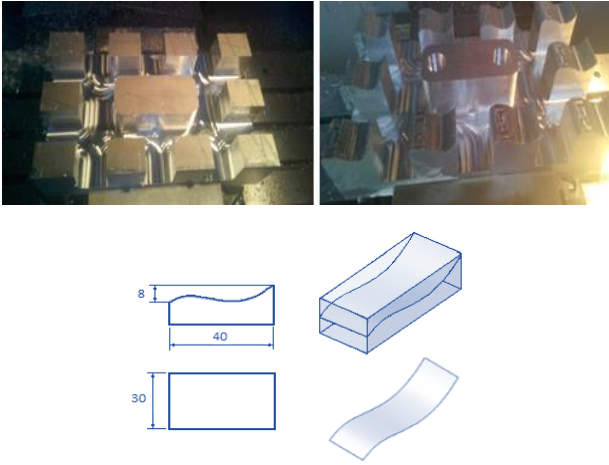
Malzeme	Çekme	Akma	Yoğunluk	Uzama	Sertlik
	Gerilmesi	Gerilmesi			
	(Mpa)	(Mpa)	(Kg/m <sup>3</sup> )	(%)	(HRb)
Al7075	570	505	2800	%11	102

Element	Zn	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu
%	0,5	0,13	0,3	0,28	0,2	Base	2.0

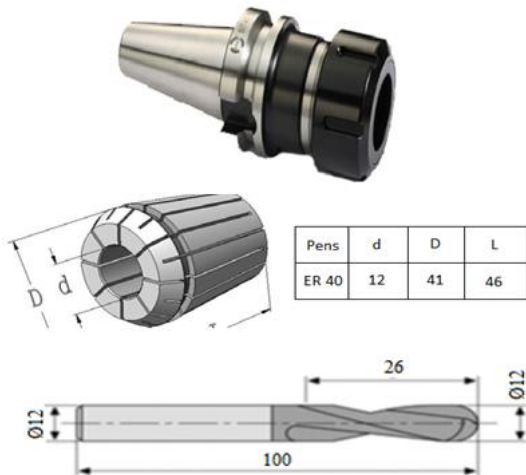
Deneylerde 253x148x60mm ebatlarında olan Al7075-T6 malzeme kullanılmıştır. Deneyler Şekil 1’de görüldüğü gibi kütük üzerinde 30x40 mm ölçülerinde serbest formlu yüzeyler oluşturularak işlenmiştir.





Şekil 1. Deney numuneleri [3]

Deneylerde TAKUMA JVH-710 CNC freze tezgâhı kullanılmıştır. Deneylerde herhangi bir soğutucu kullanılmamış, kuru kesme şartlarında frezeleme işlemi yapılmıştır. Kesici takım bağlamak için takım tutucu ve pens sistemi tercih edilmiştir. Bunun sebebi, diğer tutucuların tam sıkma işlemini gerçekleştirememesinden dolayı titreşim veya boyutsal problemlerle karşılaşılabilir. Bu sistemde ise kesici uç çevresinden dairesel olarak sıkılmaktadır. Deneylerde takım tutucu olarak BT40-ER40x80-PB ve pens olarak da ER40 pens kullanılmıştır. Kesici takım olarak serbest formlu yüzeylerin imalatında sıklıkla kullanılan TaeguTec marka dıştan soğutmalı karbür yekpare küresel uçlu parmak freze çakısı seçilmiştir. Kesici takım, tutucu ve pense ait özellikler Şekil 2’de verilmiştir.

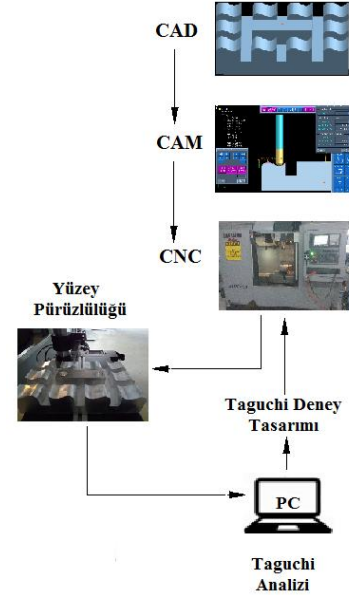


Şekil 2. Takım tutucu, pens ve kesici takım

Kesme parametreleri üretici firma kataloğuna uygun olarak dört farklı değerde ve dört farklı işleme şeklinde belirlenmiştir. Kesme parametreleri Tablo 2’de, deney şeması da Şekil 3’de görülmektedir.

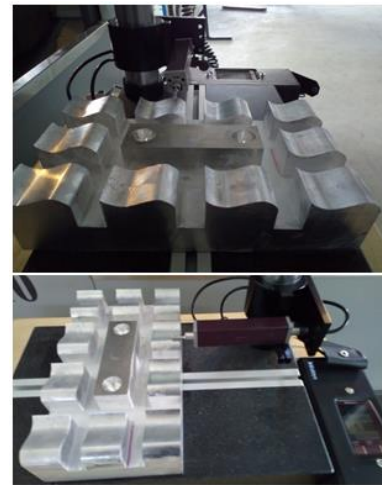
Tablo 2. Kesme parametreleri ve seviyeler

Sembol	Kesme Parametreleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Kesme Hızı (m/dk)	100	140	180	220
B	İlerleme Hızı (mm/dk)	200	500	800	1100
C	Yanal Adım (mm)	0,5	0,8	1,1	1,4
D	İşleme Şekli	Paralel	Zig-Zag	Spiral	Tek yön



Şekil 3. Deney Şeması

Tablo 2’de verilen kesme parametreleri uygulandıktan sonra oluşan Ra değerleri Mitutoyo SurfTest SJ-210 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ile işleme yönlerine dik olarak ölçülmüştür. Şekil 4’de yüzey pürüzlülüğü ölçümü verilmiştir.



Şekil 4. Yüzey Pürüzlülüğü ölçümü

Taguchi L<sub>16</sub> Ortogonal dizilim kullanılarak oluşturulan deney tasarımına göre elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. L<sub>16</sub> Ortogonal dizilim kullanarak oluşturulan deney tasarımı ve deney sonuçları

Deney No	A	B	C	D	Ra
1	1	1	1	1	1,69
2	1	2	2	2	1,78
3	1	3	3	3	1,84
4	1	4	4	4	2,14
5	2	1	2	3	1,49
6	2	2	1	4	1,38
7	2	3	4	1	2,28
8	2	4	3	2	2,30
9	3	1	3	4	2,03
10	3	2	4	3	1,75
11	3	3	1	2	1,56
12	3	4	2	1	1,73
13	4	1	4	2	2,48
14	4	2	3	1	2,24
15	4	3	2	4	2,02
16	4	4	1	3	0,74

## 2.1. Taguchi ile Sonuçların Değerlendirilmesi

Taguchi metodunda en iyi yüzey pürüzlülüğü için gerekli olan optimum kesme şartları, en küçük en iyi sinyal/gürültü oranı seçilerek yapılmıştır. MINITAB 14 programında en küçük en iyi denklemi kullanılarak S/N oranları, seviye değerleri hesaplanmıştır. Bu denklem sonucuna göre elde edilen S/N oranları Tablo 4'de verilmiştir.

Taguchi metodunda deneysel verilerin analizleri için en temel kriter sinyal/gürültü (S/N) oranıdır. Bu çalışmada Taguchi metoduna göre optimum kesme şartlarını elde etmek için S/N oranı maksimum değeri almalıdır. Bu duruma göre, L<sub>16</sub> ortogonal dizilimde Tablo 4'de en optimum kesme şartı Ra için 2,62 S/N oranı olarak bulunmuştur. 4413 ortogonal dizilim, yani 220 m/dk. kesme hızı, 1100 mm/dk. ilerleme hızı, 0,5 mm yanal adım ve spiral işleme şeklinde en iyi Ra değeri için optimum kesme şartları elde edilmiştir. Taguchi dizaynına göre Ra için MINITAB 14 programından elde edilen faktörlerin seviye değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Şekil 5'te de, Tablo 5' de verilen seviye değerlerinin grafiği verilmiştir. Bundan sonra aynı şartlarda yapılacak deneylerin optimum kesme şartlarının belirlenmesinde Tablo

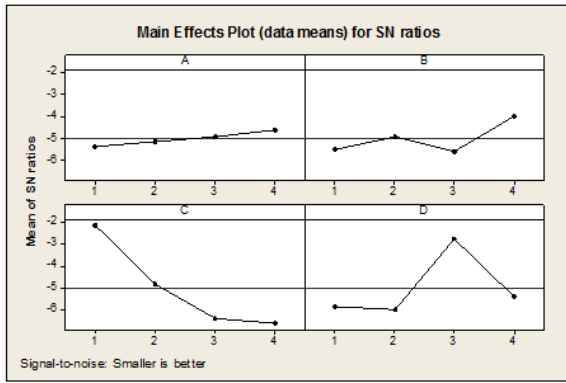
5'deki ve Şekil 5'te belirtilen A, B, C ve D faktörlerinin seviye değerlerine göre yorum yapılır. Bu durumda, A faktörünün (kesme hızı) dördüncü seviyesi, B faktörünün (ilerleme hızı) dördüncü seviyesi, C faktörünün (yanal adım) birinci seviyesi ve D faktörünün (İşleme şekli) üçüncü seviyesi yüksek olduğu Şekil 5 ve Tablo 5'de görülmektedir. Dolayısıyla yapılacak deneyler için aynı şartlarda belirlenen en uygun kesme şartları kesme hızı için 220 m/dk, ilerleme hızı 1100 mm/dk, yanal adım 0,5 mm ve işleme şekli spiral olacaktır. Tablo 5'de ayrıca kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etki gücü sırasıyla yanal adım (C), işleme şekli (D), ilerleme hızı (B) ve kesme hızı (A) olarak elde edilmiştir.

Tablo 4. L<sub>16</sub> Ortogonal diziliminde Ra için S/N oranları

Deney No	A	B	C	D	Ra	S/N
1	1	1	1	1	1,69	-4,56
2	1	2	2	2	1,78	-5,01
3	1	3	3	3	1,84	-5,30
4	1	4	4	4	2,14	-6,61
5	2	1	2	3	1,49	-3,46
6	2	2	1	4	1,38	-2,80
7	2	3	4	1	2,28	-7,16
8	2	4	3	2	2,30	-7,23
9	3	1	3	4	2,03	-6,15
10	3	2	4	3	1,75	-4,86
11	3	3	1	2	1,56	-3,86
12	3	4	2	1	1,73	-4,76
13	4	1	4	2	2,48	-7,89
14	4	2	3	1	2,24	-7,00
15	4	3	2	4	2,02	-6,11
16	4	4	1	3	0,74	2,62

Tablo 5. Yüzey pürüzlülüğü faktörü ve Ra için S/N cevap tablosu

Level	A	B	C	D
1	-5,368	-5,515	-2,151	-5,871
2	-5,164	-4,918	-4,835	-5,999
3	-4,909	-5,606	-6,421	-2,751
4	-4,596	-3,997	-6,629	-5,416
Delta	0,771	1,609	4,479	3,247
Rank	4	3	1	2



Şekil 5. Ra'nın en küçük - en iyi S/N oranına göre A, B, C, D faktör seviyelerinin grafiği

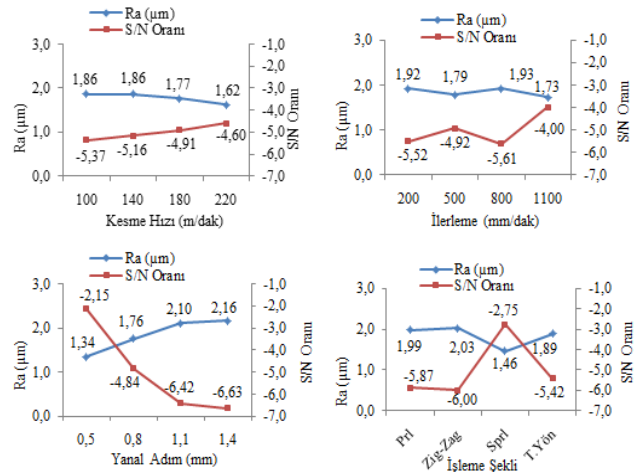
### 2.1.1. Yüzey Pürüzlülüğü Değerlerinin Varyans Analizi

Taguchi metodu ile elde edilen S/N oranından optimum kesme şartları belirlenirken, varyans analizi ile de kesme parametreleri arasındaki ilişki tespit edilmiştir. S/N'nin kesme hızı, ilerleme hızı, yanal adım ve işleme şekilleri arasındaki ilişkiler değerlendirilmiştir. Yapılan S/N ANOVA sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. ANOVA sonuçlarına göre  $p < 0,01$  veya  $p < 0,05$  anlamlılık düzeyinde olması gerekir. Bu sonuçlara göre en anlamlı değer sırası ile yanal adım, işleme şekli, ilerleme hızı ve kesme hızıdır. Yanal adım % 95 güven düzeyinde etkinlik göstermiştir. Bu sonuç aynı zamanda Tablo 5'deki önem sırasını doğrular niteliktedir.

Tablo 6. S/N-Kesme hızı, ilerleme, yanal adım ve işleme şekilleri arasındaki ilişki

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
A	3	0,03	0,03	0,01	0,25	0,86
B	3	0,12	0,12	0,04	1,05	0,49
C	3	1,71	1,71	0,57	15,18	0,03
D	3	0,83	0,83	0,28	7,39	0,07
Residual Error	3	0,11	0,11	0,04		
Total	15	2,80				

### 2.1.2. Parametrelerin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri



Şekil 6. Parametrelerin yüzey pürüzlülüğüne üzerine etkileri ve S/N oranları

S/N oranları ölçüm değerine göre Şekil 6'de yüzey pürüzlülüğü için optimum seviyeler, kesme hızı için seviye dört (220 m/dak), ilerleme hızı için seviye dört (1100 mm/dak), yanal adım için seviye bir (0,5 mm), takım yolu tarzı için seviye üç (Sprl)'tür. Elde edilen sonuçlar Şekil 5'de verilen kesme parametrelerinin optimum seviyelerini de doğrular niteliktedir.

Şekil 6 incelendiğinde kesme hızı arttıkça genel olarak yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Yanal adım arttığında ise yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlenmiştir. İlerleme değerinin farklı seviyelerinde yüzey pürüzlülüğünün arttığı veya azaldığı görülmektedir. Bu da işleme esnasında çevresel faktörlerden veya takımında meydana gelen sehimden veya tezgahdaki tıraşından kaynaklanmış olabilir. Ancak genel olarak ilermedeki artış yüzey pürüzlülüğünde azalmaya neden olmuştur. Spiral işleme tekniği yüzey pürüzlülüğü değerleri açısından küçük çıkmıştır.

## 3. SONUÇLAR

Serbest formlu yüzeylerin optimizasyonu için Taguchi deney tasarımı kullanılarak kesme parametrelerine göre Ra değerleri analizi yapılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kesme faktörleri; kesme hızı, ilerleme hızı, yanal adım ve işleme şekli olan dört parametre ve her birinde dört farklı seviye ile MINITAB 14 programında Taguchi metodu kullanılarak  $L_{16}$  ortogonal dizilim elde edilmiştir. Bu sayede tam faktöriyel 256



deney yerine 16 deney yapılmıştır.  $L_{16}$  ortogonal dizilimine göre yapılan deneyler neticesinde  $R_a$ 'nın S/N oranları bulunmuştur. En küçük en iyi (the smaller-the better) S/N oranı denklemi kullanılarak, S/N oranında maksimum değer aranmıştır. Maksimum S/N oranı en optimum kesme parametrelerini vermektedir. Serbest formlu yüzeylerin işlenmesinde en düşük yüzey pürüzlülüğü için  $R_a$  değerinin maksimum 2,62 S/N değerine karşılık gelen optimum kesme şartları (4413), 220 m/dk kesme hızı, 1100 mm/dk ilerleme, 0,5 mm yanal adım ve spiral işleme şekli olmuştur.

- Parametrelerin etkinlik sıralaması yanal adım, işleme şekli, ilerleme ve kesme hızı olarak sıralanmıştır.
- S/N oranlarına varyans analizi uygulanarak, kesme parametrelerinin  $R_a$  üzerindeki ilişki düzeyleri belirlenmiştir. ANOVA analizine göre  $R_a$  değerinde yanal adımın %95 güven düzeyinde etki ettiği sonucuna varılmıştır.
- Kesme hızı arttıkça genel olarak yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Yanal adım arttığında ise yüzey pürüzlülüğünde artış gözlemlenmiştir.
- En düşük yüzey pürüzlülüğü spiral işleme yönteminde meydana gelmiştir.

## REFERANSLAR

- [1] J. Yan ve L. Li, "Multi-objective optimization of milling parameters-the trade-offs between energy, production rate and cutting quality," *Journal of Cleaner Production*, vol. 52, pp. 462-471, 2013.
- [2] H. Sarı, "Frezelemede takım geometrisi ve tırlama titreşimlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri," *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 2008.
- [3] M. Kurt, S. Hartomacıoğlu, B. Mutlu ve U. Köklü, "Minimization of the surface roughness and form error on the milling of free-form surfaces usinga grey relational analysis," *Materiali in tehnologije*, vol. 46, no. 3, pp. 205-213, 2012.
- [4] İ. Lazoğlu, C. Manav ve Y. Murtezaoğlu, "Tool path optimization for free form surface machining" *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 58, no. 1, pp. 101-104, 2009.
- [5] N. Mohri, N. Saito, M. Higashi ve N. Kinoshita, "A new process of finish machining on free surface by EDM methods," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 207-210, 1991.
- [6] W. B. Rashid, S. Goel, J. P. Davim ve S. N. Joshi, "parametric design optimization of hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC)" *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 82, no. 1, pp. 451-462, 2016.
- [7] M. Gupta ve S. Kumar, "Investigation of surface roughness and MRR for turning of UD-GFRP using PCA and Taguchi method," *Engineering Science and Technology, International Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 70-81, 2015
- [8] J. L. Yang ve J. C. Chen, "A systematic approach for identifying optimum surface roughness performance in end-milling operations," *Journal of industrial technology*, vol. 17, no. 2, pp. 1-8, 2001.
- [9] K. Shi, D. Zhang, J. Ren, C. Yao ve X. Huang, "Effect of cutting parameters on machinability characteristics in milling of magnesium alloy with carbide tool," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 1, 2016.
- [10] M. Hamamcı, "Yüksek Hızlı İşlemede Kesme Parametrelerinin Yüzey Kalitesi Açısından Optimizasyonu," *Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri enstitüsü*, Kayseri, 2012.
- [11] N. R. Dhar, M. Kamruzzaman ve M. Ahmed, "Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel," *Journal of materials processing technology*, vol. 172, no. 2, pp. 299-304, 2006.
- [12] J. T. Krishankant, M. Bector ve R. Kumar, "Application of Taguchi method for optimizing turning process by the effects of machining parameters," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 263-274, 2012.
- [13] T. Rajasekaran, K. Palanikumar ve S. Arunachalam, "Investigation on the turning parameters for surface roughness using

- Taguchi analysis,” *Procedia Engineering*, vol. 51, pp. 781-790, 2013.
- [14] S. Ramesh, R. Viswanathan ve S. Ambika, “Measurement and optimization of surface roughness and tool wear via grey relational analysis, TOPSIS and RSA techniques,” *Measurement*, vol. 78, pp. 63-72, 2016.
- [15] G. Samtaş, “Optimisation of cutting parameters during the face milling of AA5083-H111 with coated and uncoated inserts using Taguchi method,” *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 17, no. 3, pp. 211-232, 2015.
- [16] İ. Tekaüt, M. Günay ve U. Şeker, “Optimization of cutting parameters and chip breaker form by taguchi method in turning operations,” *6th International Advanced Technologies Symposium*, 2011.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 17.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 20.04.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.298701	

## Yıkım çalışması nedeniyle örnek bir yapıda oluşan yapısal hasarlar ve bu hasarların performans seviyesine etkisi

Turgay Çoşgun<sup>1\*</sup>

### ÖZ

Ülkemizin büyük çoğunluğu deprem kuşağında yer almaktadır. Buna rağmen, sanayileşmenin getirdiği göçler nedeniyle kontrolsüz bir büyüme ile kentleşme süreci yaşanmıştır. Bu hızlı ve kontrolsüz büyüme, kentlerimizde sağlıklı ve emniyetsiz bir yapılaşmanın ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu durumun ortadan kaldırılması, sağlıklı ve emniyetli yapılar ile sosyal donatı alanlara sahip bir kentleşme için başlatılan kentsel dönüşüm süreci de beraberinde birçok sorunların ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu sorunlardan en önemlisi ise yıkım çalışmalarının uygulamada fen ve sanat kurallarına aykırı olarak gerçekleştirilmesidir. Bu kapsamda sunulan çalışmada, yıkım çalışması nedeniyle komşu parselde yer alan bir konut yapısında oluşan yapısal hasarlar ile bu hasarın, deprem etkilerine karşısında yapının performans seviyesine olan etkisi belirlenerek, yapının belirli bir bölgesindeki taşıyıcı elemanların veya bir elemanın değil, bütününe güçlendirilmesi gerekliliği, oluşturulan modeller sonrası gerçekleştirilen yapısal analizlerle ortaya konulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Yıkım, yapısal hasarlar, doğrusal olmayan analiz

## Structural damages of a model building due to destruction of an adjacent building and their influences on the performance levels

### ABSTRACT

In Turkey, majority of the living areas is located on earthquake zones. However, uncontrolled growth of population and urbanization have been occurred as a result of the immigration associated with industrialization. The rapid and uncontrolled growth has caused unplanned and insecure constructions in our cities. The urban renewal process for eliminating the situation and creating safe and planned cities associated with social reinforcement areas has lead to many problems. The most important one of these problems is the demolition works which do not fit in scientific and art regulation rules. In this project, the structural damages on a building which is located next to the demolition area and their influences on the building performance under earthquake have been studied and the structural analysis via the process of model samples showed that the whole system must be strengthened rather than the bearing members in a defined area.

**Keywords:** Demolishment, Structural Deformations, Nonlinear Analysis

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

1\* <http://aves.istanbul.edu.tr/costur/> - İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Müh. Bölümü AVCILAR/İSTANBUL

© 2017 Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
<http://dergipark.gov.tr/saufenbilder>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Deprem riski altındaki alanlarda yer alan riskli yapıların bulunduğu arsa ve arazilerde, fen ve sanat kurallarına uygun, sağlıklı ve güvenli yaşama ortamları oluşturmak amacıyla iyileştirme ve yeniden inşaata yönelik olmak üzere 6306 sayılı kanun yürürlüğe konulmuştur [1]. Kanunun uygulanması kapsamında, riskli yapılar ile riskli alan ve rezerv yapı alanlarının belirlenmesi, riskli yapıların yıktırılmasının usûl ve esasları uygulama yönetmeliği ile belirlenmiştir. Ancak uygulamada özellikle yıkım çalışmaları fen ve sanat kurallarına aykırı olarak gerçekleştirilmektedir. Sunulan çalışmada, yıkım çalışması nedeniyle komşu parselde yer alan bir konut yapısında oluşan yapısal hasarlar ile bu hasarın, deprem etkileri karşısında hasarlı yapının yapısal davranışı ile performans seviyesine olan etkisi belirlenerek, yapının belirli bir bölgesindeki taşıyıcı elemanların veya bir elemanın değil, yapının bütününe güçlendirilmesi gerekliliği, oluşturulan modeller sonrası gerçekleştirilen yapısal analizlerle ortaya konulmaktadır.

## 2. DOĞRUSAL ELASTİK OLMAYAN ANALİZ YÖNTEMLERİ (NONLINEAR ANALYSIS)

Yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışları kapsamında gerçekleştirilen teorik ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar, yapıların gerçek davranışının belirlenmesine imkan sağlamaktadır. Bu sayede yapıların göçme yükü esasına göre boyutlandırılmaları için hesap yöntemlerinin geliştirilmesi için araştırmalar gerçekleştirilmektedir [2]. Büyükşehirler de özellikle 1998 öncesi inşaa edilmiş yapıların, mevcut yapısal özelliklerini de dikkate alarak ve mevzuat kriterlerine uygun şekilde yapısal performanslarının belirlenmesi ile güçlendirme analizleri için kullanılacak doğrusal elastik olmayan hesap yöntemlerinin amacı ilgili yönetmelikte kapsamlı bir şekilde açıklanmaktadır [3]. 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte (DBYBHY 2007) doğrusal elastik olmayan analiz yöntemleri, artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi, artımsal mod birleştirme yöntemi ve zaman tanım alanında hesap yöntemi olarak sıralanmaktadır. Yönetmelikte gösterilen yöntemlerden ilk ikisi; yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışını da dikkate alarak

deprem etkisi altındaki performansın belirlenmesi ve güçlendirmeye yönelik hesapları da gözetilen yük artımı esaslı yöntemlerdir. Yük artımı esaslı yapısal analiz ile performans değerlendirmesinde izlenecek yol belirtilen yönetmelikte kapsamlı olarak verilmektedir. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte (DBYBHY 2007); malzeme bakımından doğrusal elastik olmayan davranış için yığılı plastik davranış modeli esas alınmaktadır. Bu modelde, çubuk eleman olarak idealleştirilen kiriş, kolon ve perde türü taşıyıcı sistem elemanlarındaki iç kuvvetlerin plastik kapasitelerine eriştiği sonlu uzunluktaki bölgeler boyunca, plastik şekil değiştirmelerin düzgün yayılı biçimde olduğu kabul edilmektedir. Ayrıca elasto-plastik davranışı esas alarak yapılan analizler sonucu belirlenen yük kapasitesi ile elastik çözüm sonucu bulunan yatay yük kapasitesi arasındaki geçişi sağlamaya yönelik, taşıyıcı sistem türüne ve kapasite tasarımını esas alan geçiş katsayısı tanımlanmaktadır. Yapıların deprem performansının değerlendirilmesi kapsamında statik itme analizine dayalı doğrusal olmayan analiz yöntemleri, karşılaşılan problemler nedeniyle uygulama da her geçen gün daha çok kullanılmaktadır [4]. Büyük şehirlerdeki betonarme yapıların çoğunluğunun yapısal hasar görebilirliğine dair ülkemizde gerçekleştirilen birçok akademik çalışma bulunmaktadır [5]. Deprem etkileri altındaki binaların performanslarının belirlenmesinde kullanılan doğrusal olmayan statik yük artımı esaslı analizler ile dinamik analizlerin karşılaştırılarak değerlendirilmesine ve uygulamasına yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve literatürde yayınlanmıştır [6-7-8-9-10]. Bu çalışmaların yanı sıra bitişik parseldeki yıkım çalışmaları nedeniyle hasar uğrayan betonarme yapılara da uygulamada sıkça karşılaşılmaktadır [11].

## 3. SAYISAL UYGULAMA (NUMERICAL APPLICATION)

### 3.1. Hasara Uğrayan Yapı Hakkında Genel Bilgiler (General Information)

Bitişik parseldeki yıkım çalışmaları nedeniyle hasar uğrayan betonarme yapılar kapsamında incelemesi detaylı bir şekilde gerçekleştirilen yapı ; 2Bodrum Kat, Zemin Kat, 2 Normal kattan ibarettir. Yapının taşıyıcı sistemi çerçeve olup; kolon, kiriş ve döşeme elemanlarından ibarettir.

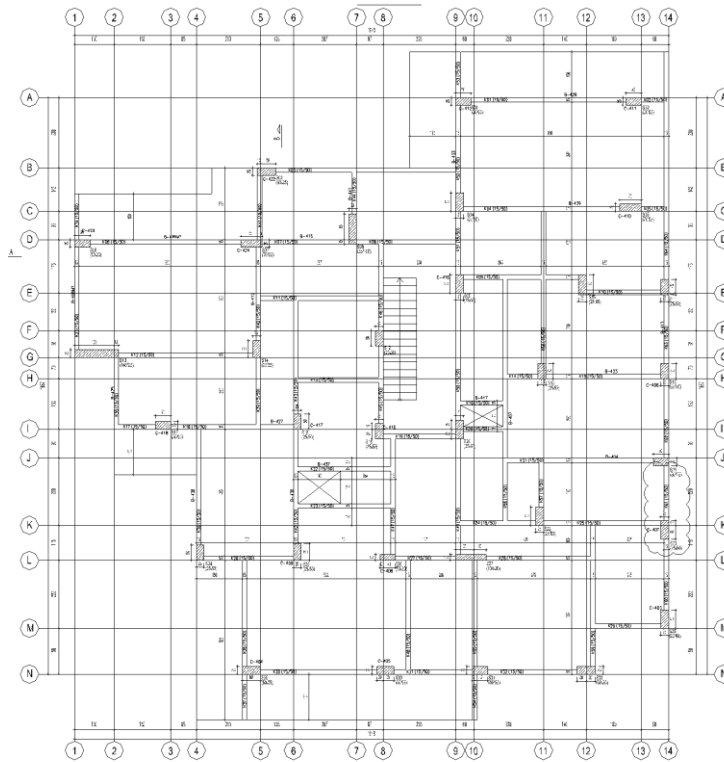
Rölöve çalışması ile elde edilen kat kalıp planında yapı, x ve y yönlerinde 14'er aks olarak tasarlanmıştır. Kentsel dönüşüm çalışmaları kapsamında yıkımı gerçekleştirilen komşu yapının, inceleme konusu edilen yapının taşıyıcı elemanlarına çarpma sonucu iki adet elemanda yapısal hasarlar meydana gelmiştir. Yapının hasara uğrayan bir adet düşey taşıyıcı kolon elemanı ile bir adet yatay taşıyıcı kiriş elemanının hasarlı hali Şekil 3.1.'de, yapının mevcut kat planı Şekil 3.2.'de ve malzeme özelliklerinin belirlenmesi kapsamında alınan beton karot

numunelerine ait basınç dayanımları ise Tablo 3.1'de verilmiştir.

Gerçekleştirilecek hesaplamalar kapsamında, halen yürürlükte olan ilgili yönetmelik hükümleri gereğince ortalama beton basınç dayanımı bulunmuş, bulunan bu dayanımdan standart sapma çıkartılmış ve silindirik dayanımına çevrilmiştir. Ayrıca yönetmelik uyarınca, orta bilgi düzeyi kabulü ile dayanım 0.9 ile çarpılmıştır. Hesaplamaların neticesine ait değerler Tablo 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Yapısal Hasarlar (Structural damages)



Şekil 2. Hasarlı yapının kat planı (Floor plan of damaged structure)



Tablo 1. Beton Basınç Dayanımları (Concrete compressive strengths)

Sıra No	Kat	Eleman Adı	Basınç Dayanımı (Mpa)
1	2.Normal Kat	S07	16.2
2	2.Normal Kat	S01	12.4
3	2.Normal Kat	S11	21.4
4	1.Normal Kat	S415	25.4
5	1.Normal Kat	S423	22.2
6	1.Normal Kat	P411	23.1
7	Zemin Kat	S312	13.8
8	Zemin Kat	S317	21.6
9	Zemin Kat	S316	17
10	1.Bodrum Kat	S102	19.3
11	1.Bodrum Kat	S225	18.3
12	1.Bodrum Kat	P105	26.5
13	2.Bodrum Kat	S109	20.1
14	2.Bodrum Kat	S108	17.7
15	2.Bodrum Kat	S122	15.9

Tablo 2. Hesaplamalara esas beton basınç dayanımları (Concrete compressive strength for calculation)

Ortalama Basınç Dayanımı	19.39Mpa
Standart Sapma	4.05 Mpa
Ortalama- Standart Sapma	15.34Mpa
Silindirik beton basınç dayanımı	9.61Mpa
Orta bilgi düzeyi	11.74Mpa

Yapının düşey taşıyıcı kolon elemanları ile yatay taşıyıcı kiriş elemanlarının kesit ve donatı bilgileri, en alttaki elemanlar için Tablo 3.3 ile Tablo 3.4'de verilmektedir. Donatı sınıfı S220 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Yapının kolon elemanlarına ait en kesit özellikleri (Cross-section properties of Columns)

Yapının kolon eleman kesitleri	25/60	50/25	70/25	55/25	25/55	25/50
Kolon donatı bilgileri	8Ø16	8Ø16	10Ø16	8Ø16	8Ø16	8Ø16
Etriye çapı ve aralığı	Ø8/25	Ø8/25	Ø8/25	Ø8/25	Ø8/25	Ø8/25

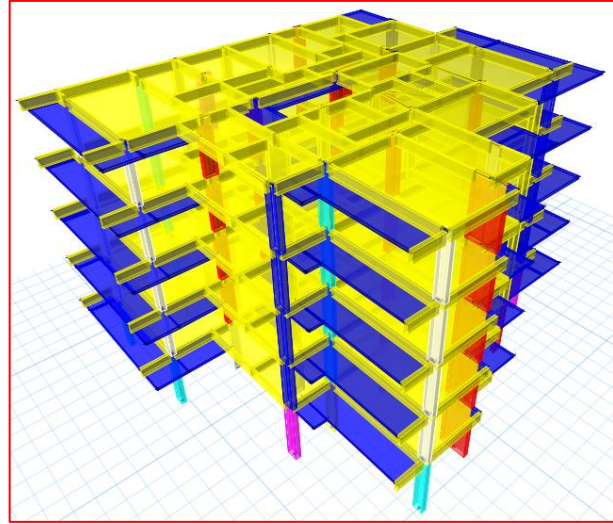
Tablo 2. Yapının kolon elemanlarına ait en kesit özellikleri (Cross-section properties of Columns)

Yapının Kiriş eleman kesitleri	15/50	15/50	15/50	15/25
Kiriş donatı bilgileri	4Ø16	4Ø16	4Ø16	4Ø16
Etriye çapı ve aralığı	Ø8/26	Ø8/27	Ø8/28	Ø8/30

### 3.2. Sayısal Çözümleme (Numerical Analysis)

İki adet taşıyıcı elemanı hasar gören yapının deprem yükleri altındaki davranışını belirlemek amacıyla; yapının yerinde tespit edilen mevcut malzeme özellikleri, rölöve çalışmaları ile elde edilen tüm veriler dikkate alınarak, üç farklı durum için sonlu elemanlar modeli oluşturulmuş ve doğrusal olmayan modal statik itme yöntemi ile yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda modal pushover analizleri yapılmış ve üç ayrı durum ve yön için ayrı modal analizler tanımlanmıştır.

Bu kapsamda öncelikle yapının hasar görmemiş hali göz önüne alınarak hesap modeli oluşturulmuş ve yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Yapının malzeme özellikleri ve rölöve çalışmalarından elde edilen eleman boyutları dikkate alınarak oluşturulan üç boyutlu sonlu elemanlar ile hesap modeline ait görünüşler Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Yapının üç boyutlu sonlu elemanlar modeli (Three-dimensional finite elements model of structure)

Yapının hasar gören kolon ve kiriş elemanı mevcut halde yük taşıma kapasitesini tamamen yitirmiş durumdadır. Bu durumun hesap modeli oluşturulurken hasar görmüş kolon ve kiriş elemanı modelden çıkartılmış ve bu hali ile yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Hasarlı durumu göz önüne alarak oluşturulan hesap modeline ait görünüş Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

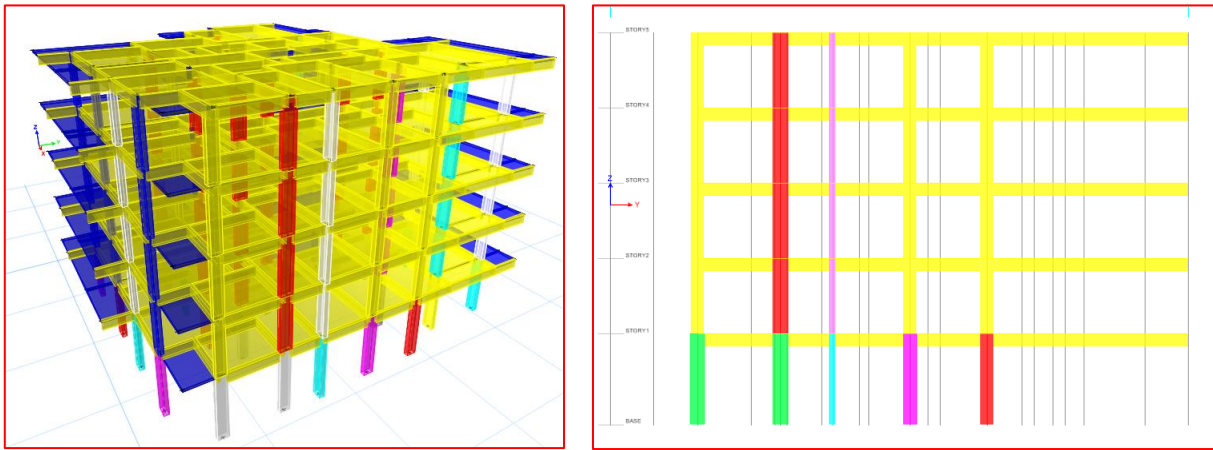
Yapıda meydana gelen hasar sonrası oluşan deformasyonlar geri döndürülmeden, hasar gören kolon ve kirişin yerine yeni bir kolon ile yeni bir kirişin inşa edildiği durumu temsil edecek şekilde uçları mafsalı yeni bir kolon ve kirişin hesap modeli ise Şekil 2.6'da verilmektedir.

Gerçekleştirilen yapısal analizlerde ilgili hesap modellerin özellikleri kapsamında, kolon ve kirişler için 0,40 çatlama kesit rijitliği kullanılmış ve hedef tepe yer değiştirme her yön ve durum için ayrı ayrı belirlenerek, yapısal sistem bu yer değiştirmelere ulaşmaya kadar itilerek analiz sürdürülmüştür. Hasar gören kolonun bulunduğu zemin kat üzerinde iki adet kat bulunması, hasarlı kolonun kenar kolon olması, yük dağılımının yeniden oluşumu, gibi hususlar da ilgi kısımlarda göz önüne alınmıştır. Ancak gerçek durumda yapının bir adet kolonu ile bir adet kirişinin taşıyıcılık özelliğini tamamen yitirmesi nedeniyle, gerçek davranışın belirlenmesi

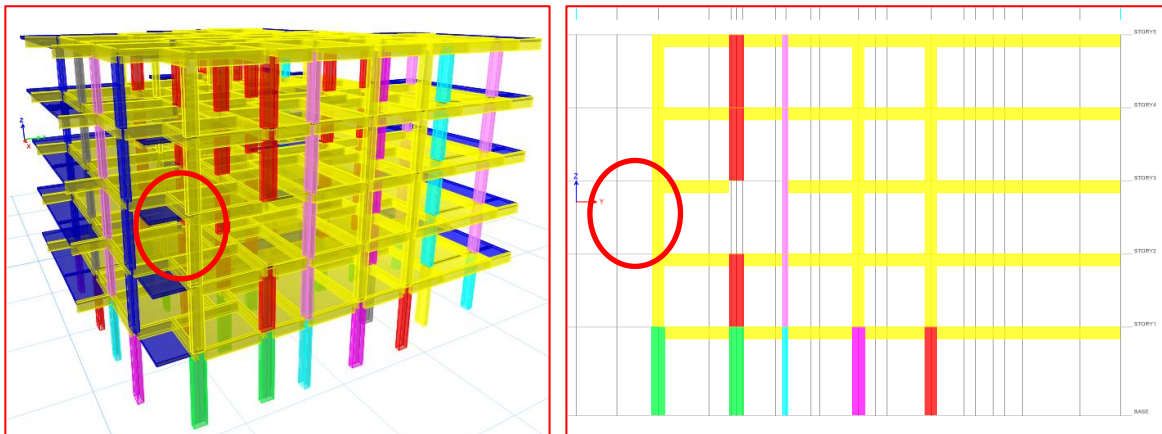
amacıyla da, bu elemanlar sonlu eleman modelinden kaldırılmıştır. Ayrıca salt bu hasarlı kolonun yerinden kaldırılması ve yerine yeni bir kolon imalatının gerçekleştirilmesi aşamasında deformasyonların oluşmasının beklenebilir bir durum olduğu göz ardı edilmemelidir. Hasar gören kolon elemana bağlanan kiriş elemanlar ile üst kattaki bu hasarlı kolonun devamındaki kolon eleman ile buna bağlı kirişlerde plastik mafsalların geri dönülemeyecek bir şekilde meydana geldiği analizlerden açık bir şekilde görülmektedir.

Yapısal analizler başlangıçta depremsiz durumda ve sadece mevcut düşey yükler (zati + hareketli yükler- $200\text{kg/m}^2$ ) esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Yapının deformasyona uğramış durumu; mevcut orijinal hali, taşıyıcı kolon ve kirişinin kaldırıldığı hal ve iki ucu mafsallı olarak kolon ve kiriş elemanın eklenmesi hali için Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da gösterilmiştir.

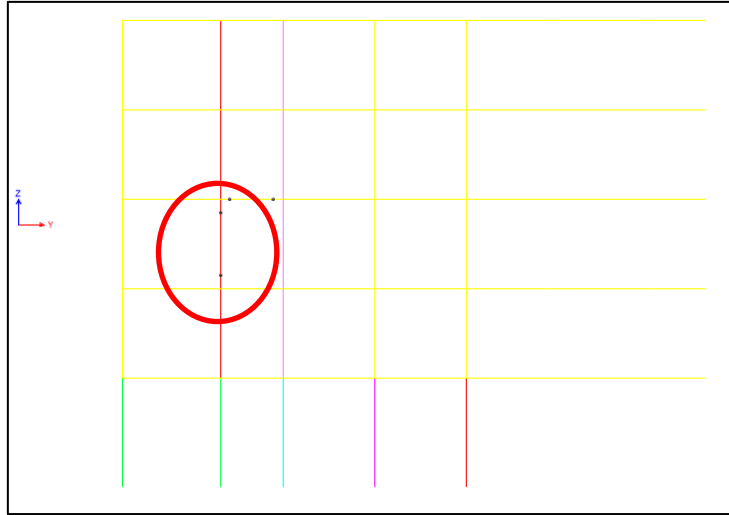
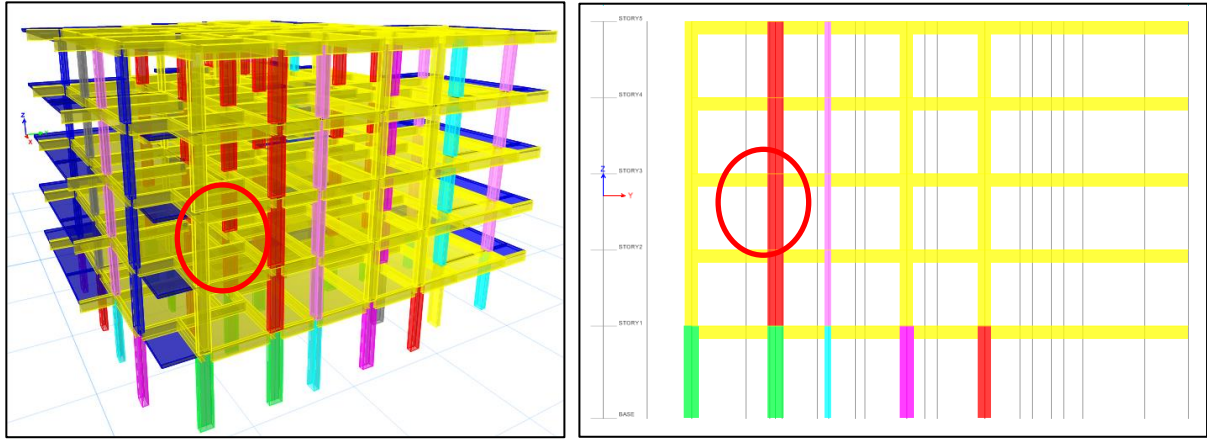
Yapısal analizlerden elde edilen ve şekillerden; komşu yapının yıkımı esnasında çarpma sonucu, inceleme konusu binanın kolon ve kirişinde meydana gelen hasar nedeniyle, yapının taşıyıcı elemanlarında, can güvenliği performans seviyesini aşan mafsalların meydana geldiği ve bu nedenle taşıyıcı elemanlarda geri döndürülemeyen hasarların oluştuğu kolaylıkla anlaşılmaktadır. Yapının çarpma öncesi yapısal güvenliğine kavuşması açısından, hasarlı elemanlar yerine iki ucu mafsallı olarak kolon ve kiriş yeni elemanın eklenmesi halinde dahi, oluşan plastik mafsalların geri döndürülemediği görülmüştür. Yapı ayrıca deprem etkilerine maruz bırakılarak her üç ayrı model için statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Deprem etkilerine maruz bırakılarak üç farklı durum için gerçekleştirilen analiz sonuçları Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



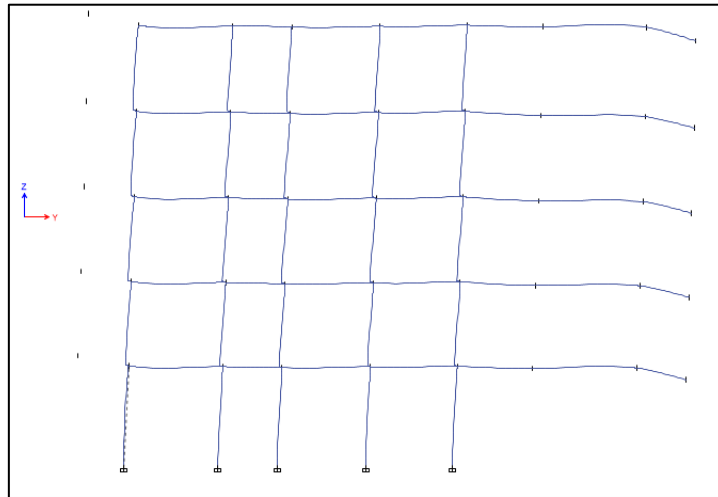
Şekil 4. Hesap modeli (The calculation model)



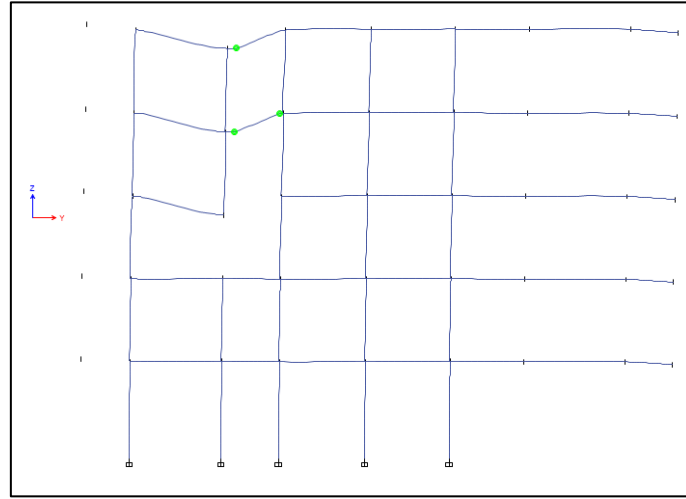
Şekil 5. Hasarlı durumu gösterir hesap modeli (The calculation model for the damaged condition)



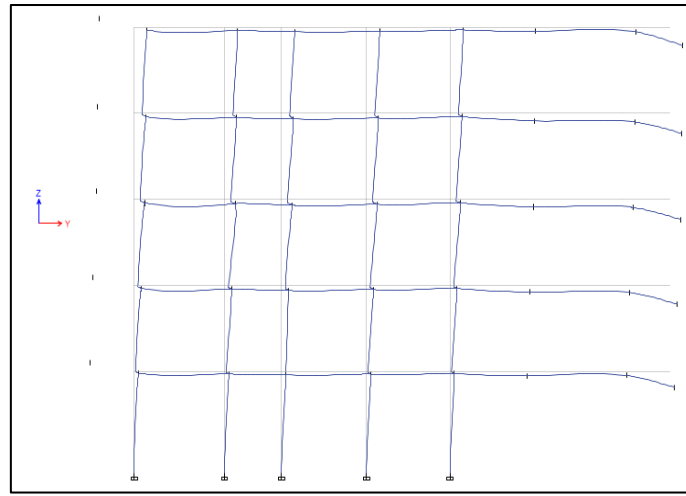
Şekil 6. Yeni eleman ilavesini gösterir hesap modeli (The calculation model for a new member addition)



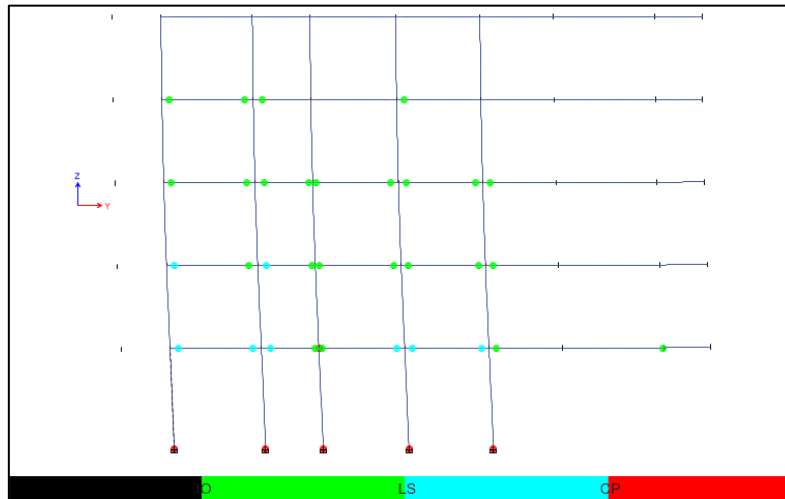
Şekil 7. Yapının orijinal hali (The original form of the structure)



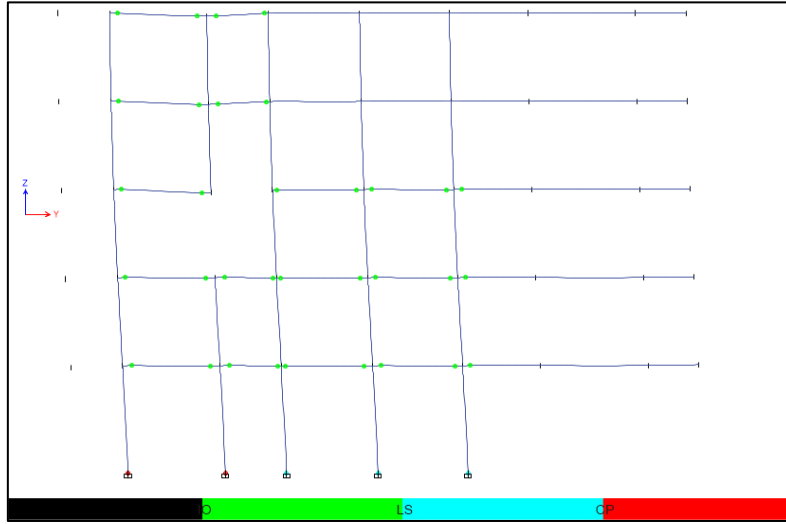
Şekil 8. Kolon ve kiriş elemanın kaldırıldığı durum (The condition of removed column and beam members)



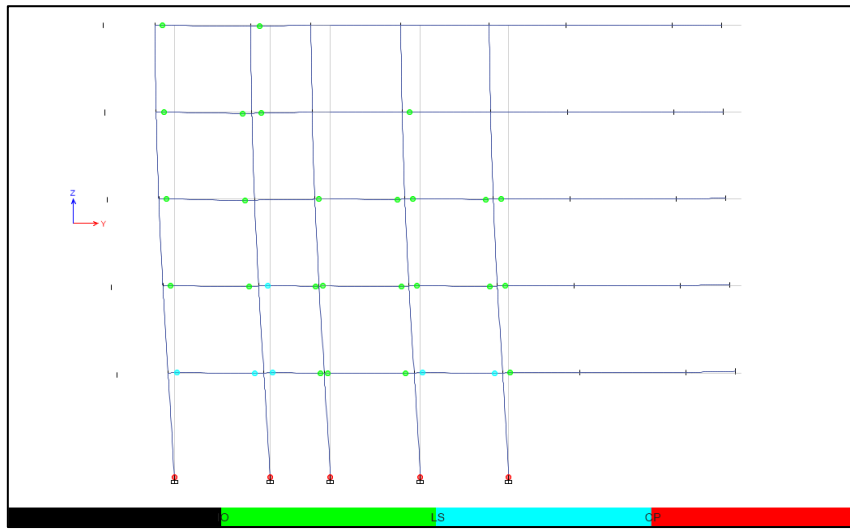
Şekil 9. İki ucu mafsallı olarak kolon ve kiriş yeni elemanın eklenmesi hali (The condition of addition of new column and beam containing hinges on each end)



Şekil 10. Yapının orijinal hali (The original form of the structure)



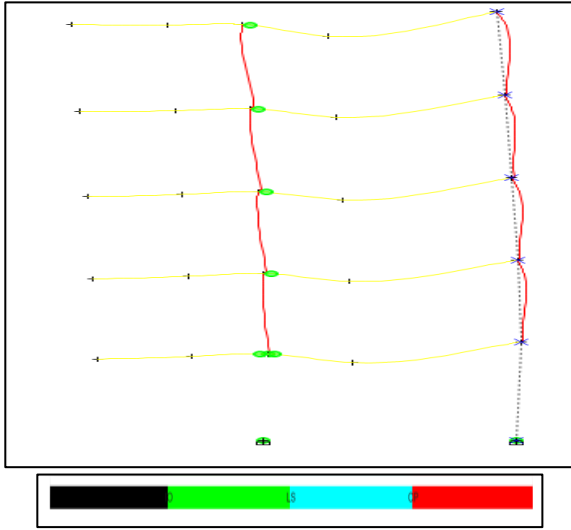
Şekil 11. Kolon ve kiriş elemanın kaldırıldığı durum (The condition of removed column and beam members)



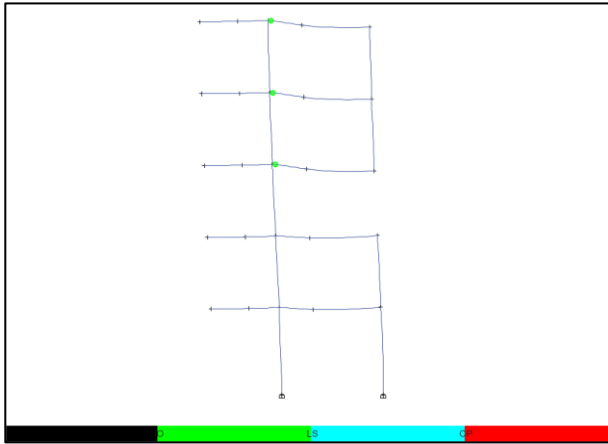
Şekil 12. İki ucu mafsallı olarak kolon ve kiriş yeni elemanın eklenmesi hali (The condition of addition of new column and beam containing hinges on)

Yapının ilk hali-rijinal durum incelendiğinde, inceleme konusu yapının, komşu binanın kentsel dönüşüm nedeniyle yıkılması esnasında yapısal hasar görmese bile (hasarsız durumda) riskli olduğu görülmektedir. Çünkü hasarsız durum incelendiğinde, yapının mevcut malzeme özellikleri, boyutları ve korozyon durumunun da etkisi ile taşıyıcı elemanlarda göçme öncesi hasar seviyesinde taşıyıcı elemanların yer aldığı belirlenmiştir. Ayrıca can güvenliği seviyesinde birçok taşıyıcı eleman bulunmaktadır. Halbuki can güvenliği hasar seviyesine Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte (DBYBHY 2007) sadece belli oranda izin verilmektedir ancak göçme öncesi hasar seviyesine izin verilmemektedir. Ancak çarpma sonrası, kolon ve kirişte meydana gelen hasardan dolayı (ki bu kiriş ve kolon eleman sonradan yerine eklense dahi) olası bir deprem durumunda inceleme konusu yapıda oluşabilecek mafsallı sayısının ve hasar

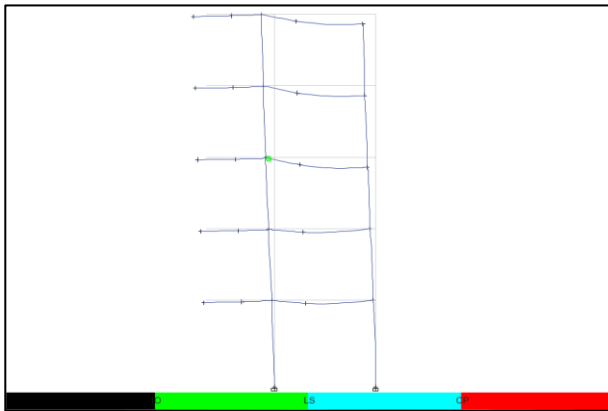
durumunun, ilk hasarsız duruma göre artacağı tartışmasız bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu hususun daha kolay ortaya koyabilmek için yapısal hasarın meydana geldiği aks için analiz sonucu oluşan plastik mafsallar ile hasar bölgeleri X yönü için de ve her üç farklı durum açısından Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de gösterilmiştir. Şekillerde verilen renk kodları, siyah için minimum hasar bölgesini, yeşil için belirgin hasar bölgesini, açık mavi ileri hasar bölgesini, kırmızı ise göçme bölgesini ifade etmektedir.



Şekil 13. 1.durum 5-5 aksı, X yönü plastik mafsallı durumu (Plastic hinge status of the first condition)

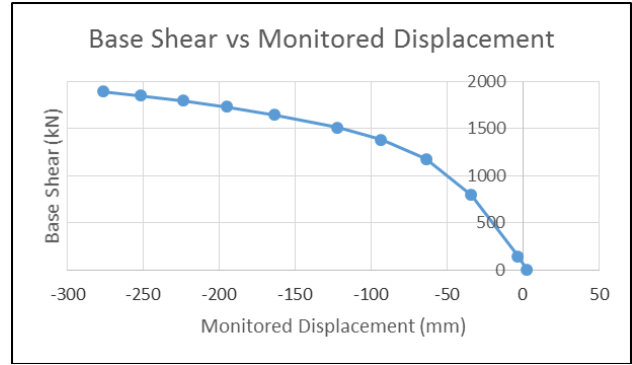


Şekil 14. 2.durum 5-5 aksı- X yönü plastik mafsallı durumu (Condition of removed column and beam members)

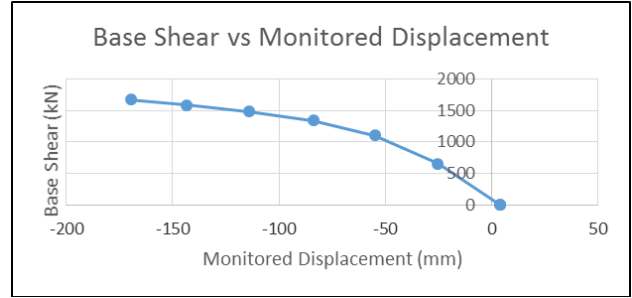


Şekil 15. 3.durum 5 aksı- X yönü plastik mafsallı durumu (Condition of addition of new column and beam containing hinges on each end)

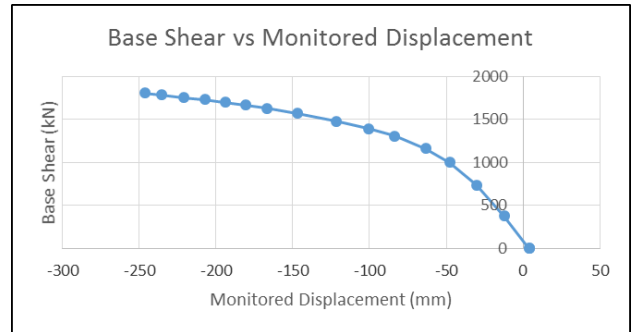
X ve Y yönleri için taban kesme kuvveti-tepe yer değiştirme ilişkilerine ait pushover grafikleri, her iki yön ve üç durum için Şekil 3.16, Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19, Şekil 3.20, Şekil 3.21'de verilmektedir.



Şekil 16. Orijinal durum Y yönü taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi ( Base shear force- monitored displacement relationship)

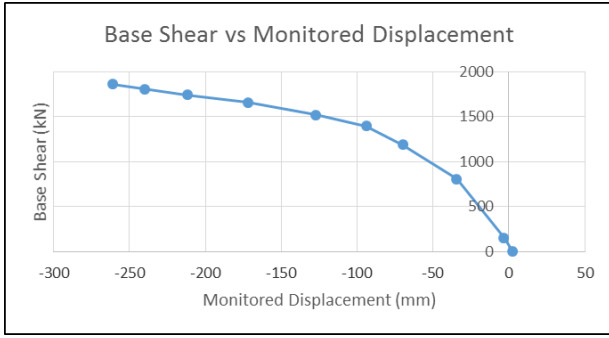


Şekil 17. 2.Durum Y yönü taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi (Base shear force- monitored displacement relationship for the condition of removed column and beam members)

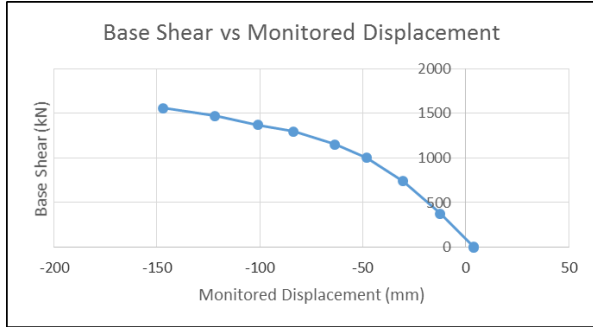


Şekil 18. 3.durum Y yönü taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi (Base shear force- monitored displacement relationship for the condition of addition of new column and beam containing hinges on each end)

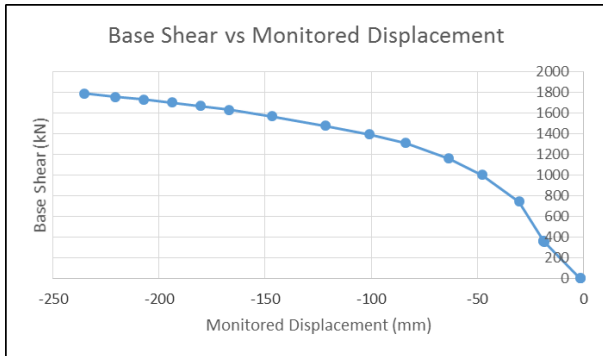
Dayanım kapasitelerini daha kolay anlayabilmek için her üç duruma ait tepe yer değiştirme ile taban kesme kuvveti arasındaki ilişki karşılaştırmalı olarak Şekil 3.22' de gösterilmiştir. Şekilde verilen gri çizgili eğri yapının hasar görmemiş ilk orijinal halini, mavi çizgili eğri kolon ve kiriş elemanının kaldırıldığı halini ve turuncu çizgili eğri ise iki ucu mafsallı olarak yeni kolon ve kiriş elemanın eklenmesi halindeki deprem kapasitesi eğrilerini temsil etmektedir. Şekilden görüldüğü üzere hasar gören yapının, kısmi onarım görmesi durumunda dahi, orijinal halindeki ilk dayanım kapasitesinden daha düşük bir dayanıma sahip olacağı ortaya çıkmaktadır.



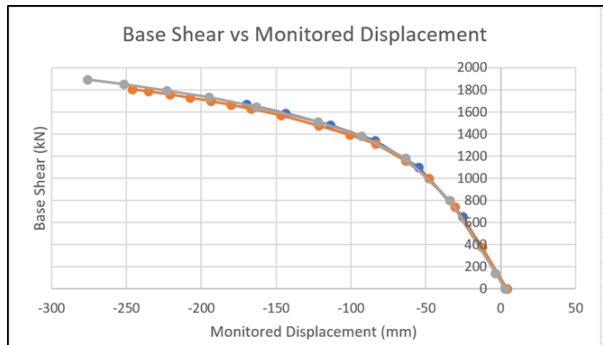
Şekil 19. Orijinal durum X yönü taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi (Base shear force- monitored displacement relationship)



Şekil 20. 2.durum X yönü taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi (Base shear force- monitored displacement relationship for the condition of removed column and beam members )



Şekil 21. 3.durum X yönü taban kesme kuvveti-yer değiştirme eğrisi (Base shear force- monitored displacement relationship for the condition of addition of new column and beam containing hinges on each end)



Şekil 22. Üç durum için taban kesme kuvveti- yer değiştirme eğrisi (Thrust curve- shear force/displacement relationship status for the three condition)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Nüfusumuzun çoğunluğunun yaşadığı büyükşehirlerimiz genelde birinci derece deprem bölgesinde yer almaktadır. Bu nedenle beklenen olası bir deprem öncesi mevcut yapı stokunu yenileme ve güçlendirme çalışmalarına hız verilmiştir. İşte bu çalışmalar esnasında mevcut yapılarının, fen ve sanat kurallarına aykırı olarak gerçekleştirilen yıkımı nedeniyle, komşu yapılarda ciddi boyutta yapısal hasarların oluşmasına neden olmaktadır. Bitişik parseldeki yıkım çalışmaları nedeniyle hasar uğrayan betonarme yapılar kapsamında bugüne kadar beş adet konut yapısı incelenmiş olup, kapsamlı inceleme yapılması ve analize dayalı olması nedeniyle söz konusu bu çalışma sunulmaktadır.



Sunulan çalışmada; daha önce incelenen yapılara örnek teşkil eden bir konut yapısının; hasarsız, hasarlı, yeni eleman ilavesi halindeki üç farklı durumu için, depresiz ve deprem etkisi altında, sonlu elemanlar modeli oluşturularak ve doğrusal olmayan modal statik itme yöntemi kullanılarak, yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler neticesinde, örnek konut yapısının çarpmadan önceki ilk halinin olası deprem etkileri karşısında riskli olduğu ancak çarpma sonrası, bir adet taşıyıcı kolon ve kiriş elemanda meydana gelen hasardan dolayı, düşey yükler altında bile geri döndürülemez seviyede şekil değiştirdiği ve kısmi boyutta gerçekleştirilecek bir onarım sonrasında dahi deprem etkileri karşısında yapısal güvenliğinin daha da azaldığı, yani sadece hasar gören kolon ve kiriş taşıyıcı elemanlarının yeniden imal şeklinde tamir edilmesi ile yapının hasarsız halindeki- orijinal durumdaki deprem güvenlik seviyesine hiçbir zaman ulaşmayacağı sonucuna varılmıştır.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] “Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun”, Resmi Gazete, 2012.
- [2] ÇOŞGUN, T., “Plak, Perde, Çerçeve ve Çekirdekten Oluşan Komple Yapı Sistemlerinin Nonlinear Çözümlemesi”, Doktora Tezi, İ.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2001.
- [3] “ Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik”, Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, Mart 2007.
- [4] DİNÇER, F. ve MERT, N. “Betonarme Okul Binasının TDY 2007’ye göre Nonlinear Statik

- Analizi”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, Cilt 18, Sayı 1, s.1-9, 2014.
- [5] UÇAR, T. ve DÜZGÜN, M., “Betonaarme Binalar için Artımsal İtme Analizi Esaslı Analitik Hasar Görebilirlik Eğrilerinin Oluşturulması”, İMO Teknik Dergi,s. 6421-6446, 2013.
- [6] KORKMAZ, K.A. ve DÜZGÜN, M., “ Statik Artımsal İtme Analizinde Kullanılan Yük Dağılımlarının Değerlendirilmesi”, İMO Teknik Dergi, s. 3873-3878, 2006.
- [7] AYDINOĞLU, N., “Yapıların Deprem Performansının Değerlendirilmesi için Artımsal Spektrum Analizi Yöntemi”, Beşinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 26-30 Mayıs 2003, İstanbul.
- [8] ALICI, F.S., KAATSIZ, K. ve SUCUOĞLU, H., “Genel İtme Analizinin Pratik Uygulaması”, 2. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, 25-27 Eylül 2013, Hatay.
- [9] YILMAZ, C., “ Statik İtme Analiziyle Mevcut Bir Betonaarme Yapının Performans Değerlendirmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.. Fen bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [10] NC, M.E. ve YÖN, M.ř., “Betonaarme Binaların Deprem Davranışlarının Artımsal Dinamik Analiz Yöntemiyle Değerlendirilmesi”, Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, s. 23-32, Mayıs 2016.
- [11] OşGUN, T., ÖZTOPRAK, S. ve SER, C., “ Uzman Görüşü Raporu, No: 2013/327 ”, Aralık 2014, İstanbul.
- [12] ETABS, Integrated Building Design Software, CSI, Berkeley, USA, 2016.



	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 24.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 20.04.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.300297	

## Betonarme yapılarda çerçeve süreksizliklerinin yapı davranışlarına etkisinin incelenmesi

Melike İlkun<sup>1</sup>, Hüseyin Kasap<sup>2</sup>

### ÖZ

Deprem bölgelerinde taşıyıcı sistem düzensizliklerinin olumsuz etkileri bilinmektedir. Ülkemizde betonarme binalarda özellikle kiriş süreksizliklerine sıkça rastlanmaktadır. Bu çalışmada, betonarme çerçevesel taşıyıcı sistemlerde kiriş süreksizlikleri ve aks düzensizliklerinin yapı davranışına etkisi incelenmiştir. Bu amaçla; seçilen kolon ve/veya kirişlerin yerleşimi farklı 11 yapı tipi için 4 katlı betonarme yapılar üzerinde inceleme yapılmıştır. Yapı modellerinde, kolonlara gelen kesme kuvvetleri, moment değerleri ve yapılarda oluşan toplam yanal yer değiştirmelerin değişimi incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** çerçeve sistemler, yatayda süreksizlik, deprem etkisi, kesme kuvveti, moment değişimi, yatay yer değiştirme.

## Effects of irregularities in reinforced concrete structures on building behaviors

### ABSTRACT

The adverse effects of carrier system's irregularities in earthquake zones are known. Indefinite discontinuity of beams are frequently encountered, especially in the reinforced concrete buildings of our country. In this study, the effects of beam discontinuities and axle irregularities on structural behavior of reinforced concrete frame systems are investigated/ analyzed. For this purpose, the layout of the selected columns and / or beams was investigated on 4-storey reinforced concrete structures for 11 different building types. In the case of structural models, the variation of shear forces, moment values and total lateral displacements in the structures were investigated.

**Keywords:** framed systems, horizontal discontinuity, earthquake impact, shear force, moment change, horizontal displacement.

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Melike İlkun, Sakarya – cekicmelike@gmail.com

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği, Sakarya – hkasap@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Deprem yönetmeliğimizde, depreme dayanıklı yapı tasarımının temel ilkeleri yeterli rijitlik, yeterli kararlılık ve yeterli dayanım olarak belirtilse de bunlara ilave olarak yapılarda uygun geometri, yeterli süneklik ve yeterli sönüm de son derece önemli olmaktadır. Bu kavramlar kısaca aşağıda açıklanmıştır.

1- Yeterli Rijitlik; Taşıyıcı sistemlerin, seçilen kesit boyutları ile, yapıya etkileyen yatay yükler etkisi altında, bir katın alt kata göre yapmış olduğu görelî öteleme miktarının yönetmelikte verilen sınır değerlerini aşmaması gerekmektedir. Yapıdaki yatay kuvvetler altındaki yer değiştirmelerin hesabı yanal rijitliğinin belirlenmesiyle ilişkili olmaktadır [5].

2- Yeterli Kararlılık; Bir taşıyıcı sistemin her durumda dengede kalması için kararlı olması gerekmektedir. Kararsızlığın yetersiz olması durumunda, yapıda çok az bir sapma meydana geldiğinde sistemin aniden çökmesine sebep olmaktadır.

3- Yeterli Dayanım; Taşıyıcı sistemi oluşturan elemanların, çeşitli yüklemeler etkisinde oluşan kesit zorlarını taşıma gücü aşılmadan taşıyabilmesi gerekmektedir.

4- Uygun Geometri; Yapı tasarımı basit ve düzenli yapıldığı takdirde, deprem esnasındaki davranışları incelemek ve buna göre bir çözümleme yapmak daha kolay olmaktadır. Simetrik olmayan yapılar, depremlerde simetrik yapılara oranla daha fazla hasar görmüşlerdir. Bununla birlikte her zaman simetrik olan yapılar için düzenli denilmemektedir [5].

5- Yeterli Süneklik; Yapılarda deprem sonucu hasar oluşması istenmiyorsa, yapı taşıyıcı elemanlarının elastik taşıma gücü çok büyük olmaktadır. Deprem esnasında oluşan enerjinin yapı taşıyıcı elemanlarında plastik evreye ulaşmadan, elastik evrede tüketilmelidir. Bu nedenle taşıyıcı elemanlarda kesitler büyük boyutlarda seçilmesi gerekmektedir. Süneklik değerinin fazla olduğu ve doğrusal olmayan şekil değiştirmelerin az bir bölgeye yayıldığı sistemlerde, doğrusal olmayan, eğilme şekil değiştirmelerinin plastik mafsal adı verilen kesitlerde toplandığı ve bunun dışındaki bölgelerde ise sistemin doğrusal-elastik davrandığı varsayılmaktadır [6].

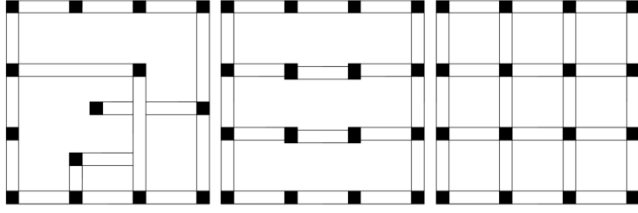
6- Yeterli Sönüm; Bir yapının sönüm değerini belirlemek pek mümkün olmamaktadır. Yapıda kullanılan malzemelerin sönüm özellikleri bilinse bile yapılarda oluşan mikro çatlakların açılıp kapanması ile enerji açığa çıkması sönümü etkileyen sebepler olup hesaplanması mümkün olmamaktadır. Yapının sönümünü artırmak için taşıyıcı sisteme sönümleyici elemanlar yerleştirilmektedir.

Taşıyıcı sistem seçiminde en önemli husus hiç şüphesiz yapının güvenliği olmaktadır. Bu durum, yapıya etki eden düşey yükler (döşeme ağırlığı, kiriş ağırlığı, duvar ağırlığı, kolon ağırlığı, eşya yükleri, kar yükleri, insan yükleri vb.), yatay yükler (deprem yükleri, rüzgar yükleri, toprak itkisi, sıvı yükü vb.) ve diğer yükler (sıcaklık farkından dolayı oluşan yük, sünmeden dolayı oluşan yük büzülmeden dolayı oluşan yük, buz yükü, patlama yükü, farklı oturmalarından dolayı oluşan yük, vb.) için, yapı sisteminin kararlı ve yeterli dayanıma sahip olması ile sağlanmaktadır.

Yapı taşıyıcı sistemi betonarme çerçevesel sistemler, perde duvarlı sistemler, boşluklu perde duvarlı sistemler, eğik elemanlı çerçevesel sistemler, perde duvarlı-çerçevesel sistemler, sismik izolasyonlu sistemler ve tüp sistemler olarak seçilmektedir. Ülkemizde ve dünyada son yıllarda meydana gelen şiddetli depremlerin ardından binalarda yapılan incelemeler doğrultusunda, perdeli binaların depreme karşı olan direncinin çerçevesel sistemlere oranla çok daha iyi olduğu ve daha az hasar gördüğü tespit edilmiştir [8]. Çerçevesel sistemlerde düşey taşıyıcı olan ve kirişleri bağlayan kolonların kütsüz oldukları kabul edilmektedir. Yapının kat kütlelerinin döşeme seviyelerinde toplu olduğu kabul edilmektedir. Böylece elastik kolon ve kirişlerin oluşturduğu ve her kat seviyesinde toplu kütsesi bulunan bir çerçeve meydana gelmektedir [2]. Çerçevesel sistemler deprem sırasında, yatay yükleri düğüm noktalarındaki elemanların rijitlikleri ile orantılı olarak karşılamaktadır. Betonarme çerçevesel sistemler yatay yük etkisi altında fazla miktarda yer değiştirme yapmaktadır. Çerçevesel betonarme taşıyıcı sistemler, süneklik, dayanım ve rijitlik özellikleri ile yatay yüklerin taşınmasını sağlamaktadır [3].

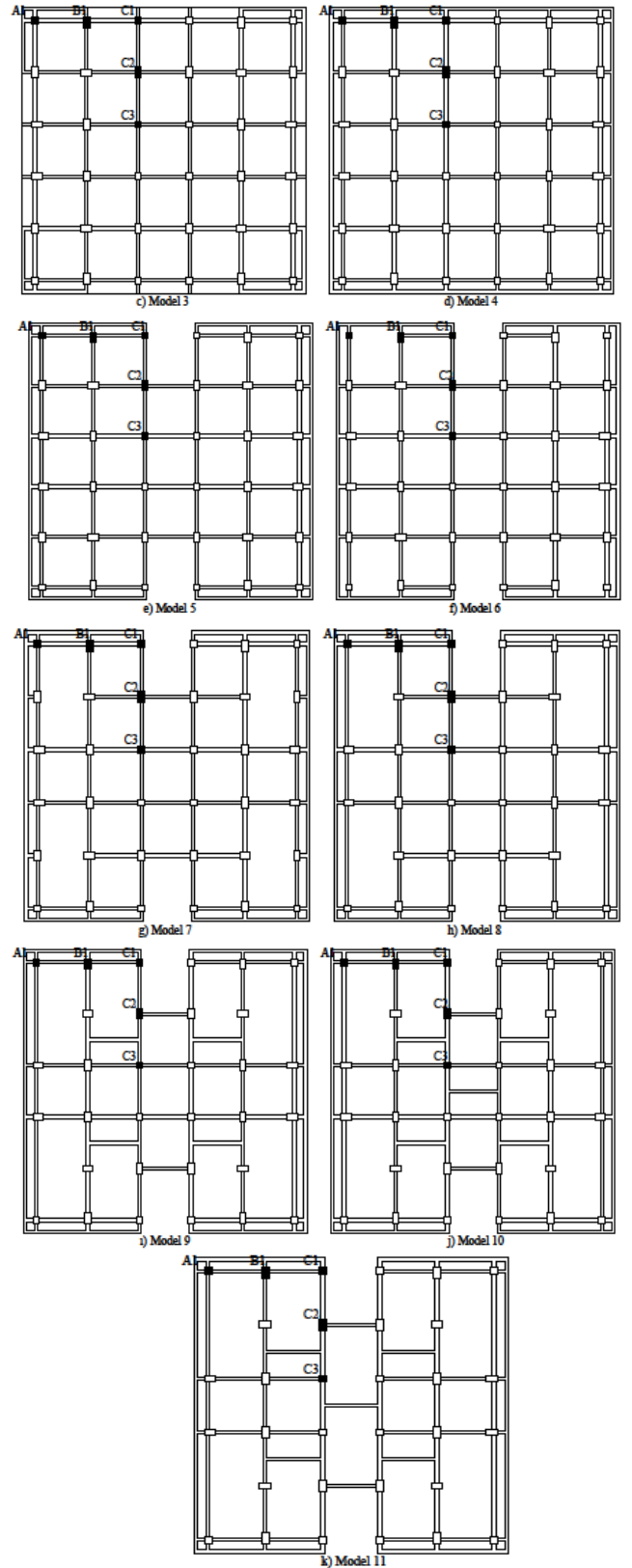
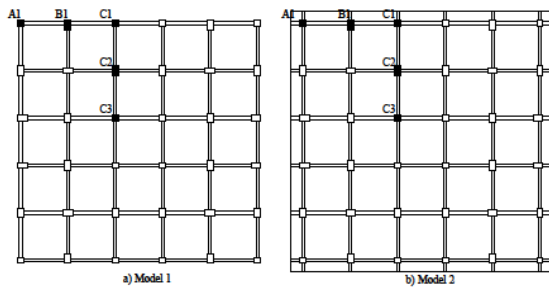
Kolon ve kirişlerden oluşan betonarme çerçevesel sistemlerde, aks sisteminin düzensiz oluşu deprem etkilerinin artmasına neden olmaktadır (Şekil 1). Ayrıca aksları düzensiz olan çerçevesel sistemlerde kısa kirişler oluşmaktadır ve bu kirişlerde deprem kuvveti altında oldukça büyük kesme kuvveti ve

eğilme momentleri meydana gelmektedir [7]. Bunun için yapıların aks sistemleri düzenli olarak tasarlanmalı, eğer mimari açıdan kısa kirişin oluşması önlenemiyor ise bu kirişlerin yüksekliklerinin azaltılması gerekmektedir.



Şekil 1. Çerçeve sistemlerin yanlış ve doğru uygulamasına örnekler

Bu çalışmada, çerçeve taşıyıcı sisteme sahip 4 katlı konut ve işyeri türündeki betonarme yapıların kolon ve/veya kiriş sistemi değiştirilerek, sistemde meydana gelen süreksizlik sonucu, kolonlarda oluşan kesme kuvvetleri ve moment değerlerinin değişimleri incelenmiştir. Ayrıca incelenen yapılarda, deprem etkisinde oluşan yatay yer değiştirmelerin değişimleri incelenmiştir. İncelenen yapılarda, zemin katta kolon boyutları, köşelerde 50cm/50cm ve diğerleri 50cm/80cm olarak seçilmiştir. Kesitlerin her katta 5 cm küçültülerek daralması sonucunda son katta bu boyutlar 35cm/35cm ve 35/80cm olmaktadır. İncelenen yapıların kat yüksekliği 3 metre, kolon aks açıklıkları 4 metredir. Kirişlerin ebatları ise 25cm/60cm boyutlarındadır. İncelenen yapı modellerinin kolon, kiriş yerleşimleri ve ele alınan kolonlar taralı olarak Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Yapı modelleri

## 2. 2. DÜZENSİZ BİNALAR (IRRAGULAR BUILDINGS)

Bina taşıyıcı sistemlerindeki düzensizler iki grupta ele alınmaktadır. Bunlar planda düzensizlik ve düşey doğrultuda düzensizlik durumlarıdır.

## 2.1. Planda Düzensiz Yapılar (Irregular building structures in a plan)

Bir taşıyıcı sistemi oluştururken düzensiz binaların tasarımından ve yapımından kaçınmamız gerekmektedir. Taşıyıcı sistem planda simetrik veya simetriğe yakın düzenlenmelidir. Tasarımından ve yapımından kaçınılması gereken planda düzensizlik durumları aşağıda özetlenmiştir.

### 2.1.1. Burulma Düzensizliği (Torsional irregular)

Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir katta en büyük görelî kat ötelemesinin o katta aynı doğrultudaki ortalama görelî ötelemeye oranını ifade eden *Burulma Düzensizliği Katsayısı*  $\eta_{bi}$ 'nin 1.2'den büyük olması durumudur. Yapılarda genel olarak burulma düzensizliği, plan geometrisinin veya taşıyıcı eleman rijitlik dağılımının simetrik olmaması nedeniyle oluşmaktadır [9].

Tamamen simetrik bir yapıda, burulma düzensizliği beklenmemesi gerekmektedir. Fakat malzeme özelliklerindeki değişimler, yapı elemanlarının kesitlerinde hesaplanandan daha farklı imal edilmesi gibi nedenlerle, depremin oluşturduğu etki yapıda farklı sonuçlar meydana getirebilmektedir.

### 2.1.2. Döşeme Süreksizliği (Pavement discontinuity)

Herhangi bir katta döşemede;

- 1- Merdiven ve asansör boşlukları dahil, boşluk alanları toplamının kat brüt alanının 1/3'ünden fazla olması durumu,
- 2- Deprem yüklerinin düşey taşıyıcı sistem elemanlarına güvenle aktarabilmesini güçleştiren yerel döşeme boşluklarının bulunması durumu,
- 3- Döşemenin düzlem içi rijitlik ve dayanımında ani azalmaların olması durumudur.

Boşluklar sebebiyle yatay deprem yüklerinin, düşey taşıyıcı elemanlara güvenli aktarılabilmesi güçleşebilmekte ya da ani rijitlik azalması olabilmektedir.

Deprem kuvvetinin yapıda kütlelerin yoğun olarak bulunduğu döşemelerde meydana geldiği kabul edildiği için, bu yüklerin döşemelere mesnetlik yapan kiriş, kolon ve perde gibi elemanlara aktarılması son derece önemlidir [10].

### 2.1.3. Planda Çıkıntılar Bulunması (Protrusion in a plan)

Bina kat planlarında çıkıntı yapan kısımların birbirine dik iki doğrultudaki boyutlarının her ikisinde de, binanın o katının aynı doğrultudaki toplam plan boyutlarının %20'sinden daha büyük olması durumudur.

## 2.2. Düşey Doğrultuda Düzensizlik Durumları (Irregularity in vertical direction)

Düşey doğrultuda düzensizlik durumları üç alt başlıkta incelenir.

### 2.2.1. Komşu Katlar Arası Dayanım Düzensizliği (Strength irregularity among neighboring floors)

Betonarme binalarda, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi birinde, herhangi bir kattaki *etkili kesme alanı*'nın, bir üstteki kattaki *etkili kesme alanına* oranı olarak tanımlanan *Dayanım Düzensizliği Katsayısı*  $\eta_{ci}$ 'nin 0.80'den küçük olması durumudur.

Herhangi bir katta etkili kesme alanı;

$$\sum A_e = \sum A_w + \sum A_g + 0.15 \sum A_k \quad (1)$$

olarak ifade edilmektedir.

Taşıyıcı sistemde ele alınan *i*'inci kattaki dolgu duvarlar alanlarının toplamı bir üstteki kata göre fazla ise  $\eta_{ci}$ 'nin hesabında dolgu duvarları dikkate almayız.  $0.60 < (\eta_{ci}) < 0.80$  aralığında ise taşıyıcı sistem davranış katsayısı,  $1.25 (\eta_{ci})_{min}$  değeri ile çarpılarak deprem doğrultusu olan X ve Y yönlerinde binanın tamamına uygulanmaktadır. Fakat  $\eta_{ci} < 0.60$  olmaması gerekir. Olduğu durumlarda ise komşu katlar arasındaki zayıf katın dayanımı ve rijitliği artırılarak deprem hesabı tekrar yapılmalıdır.

### 2.2.2. Komşu Katlar Arası Rijitlik Düzensizliği (Stiffness irregularity among neighboring floors)

Birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir *i*'inci kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranının bir üst veya bir alt kattaki ortalama görelî kat ötelemesi oranına bölünmesi ile tanımlanan *Rijitlik Düzensizliği Katsayısı*  $\eta_{ki}$ 'nin 2.0'den fazla olması durumudur.

Binanın taşıyıcı sistemi tasarlanırken gelen düşey doğrultuda ani rijitlik değişimlerinden kaçınılmalıdır. Betonarme bir sistemde yumuşak kat oluşumuna elverişli kat bulunuyorsa olası bir deprem durumunda yumuşak zemin katın üstündeki katlarda görelî yer değiştirmeler çok az olur ve binada olacak olan yer değiştirmenin

büyük bir kısmı yumuşak katta meydana gelmektedir [11].

### 2.2.3. Taşıyıcı Sistem Düşey Elemanlarının Süreksizliği (Carrier system discontinuity of vertical elements)

Binanın taşıyıcı sisteminin bütün düşey elemanları (kolonlar ve perdeler) binanın en üst katından temele kadar sürekli olarak tasarlanmalıdır. Kolonlar konsol kirişlere oturtulmamalıdır. Perdeler de kirişlere veya kolonlara oturtulmamalıdır.

## 3. DEPREM ETKİSİ ALTINDA ÇÖZÜMLEME (ANALYSIS UNDER THE EFFECT OF EARTHQUAKE)

Betonarme yapılar tasarlanırken, yönetmeliklerde yer alan ve yapıların yatay yükler altındaki çözümleri için kullanılmakta olan yöntemler dikkate alınmaktadır ve yapıların deprem etkileri altında doğrusal elastik davranış göstereceği kabul edilmektedir [4].

### 3.1. Toplam Eşdeğer Deprem Yüğü ( $V_t$ )'nin Hesaplanması (Total Equivalent Earthquake Load Calculation)

Deprem sırasında yapıya etki eden yüklerin hesabında, kullanılan yöntemler iki ana başlıkta toplanmıştır.

#### 3.1.1. Kesin Hesap Metodu (Precise Calculation Method)

Zaman tanım alanı hesap yöntemi; Gerçek yer ivme kayıtları kullanılarak analiz yapılmaktadır.

#### 3.2.2. Yaklaşık Hesap Metodu (Approximate Calculation Method)

Mod birleştirme yöntemi: Dinamik analiz yöntemi ile türetilmiş fonksiyonlar göz önüne alınmaktadır. Kütlelerin yapı katlarının düğüm noktalarında toplandığı varsayılmaktadır.

Eşdeğer deprem yükü yöntemi: Bu yöntemde yapının birinci doğal titreşim periyodu kullanılmaktadır. Kat ağırlıkları, kat seviyesinde toplanmış olduğu kabul edilmektedir. Deprem hesabı yapılacak binalarda, Eşdeğer deprem yükü yönteminin uygulanabilmesi için deprem yönetmeliğindeki koşulları sağlaması gerekmektedir.

Toplam Eşdeğer Deprem Yüğü  $V_t$ 'yi belirlerken, yönetmelikteki esaslar dikkate alınarak çözümlenmektedir.

## 4. İNCELENEN YAPILARIN DEPREM ETKİSİ ALTINDAKİ ANALİZİ (ANALYSIS OF EXAMINED STRUCTURES UNDER THE EARTHQUAKE EFFECT)

Bu çalışmada incelenen yapıların hesabında esas alınan değerler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Yapı Bilgileri

Yapı Bilgileri	
Zemin Gurubu	D
Yerel Zemin Sınıfı	Z4
Etkin Yer İvmesi Katsayısı	0.40
Bina Önem Katsayısı	1.0
Spektral İvme Katsayısı	$A(T) = A_0 \cdot I \cdot S(T)$
Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı	8
Spektrum Katsayısı	$T_A \leq T \leq T_B \rightarrow S(T) = 2.5$

### 4.1. Katlara Etkiyen Eşdeğer Deprem Yüğüleri ( $F_i$ )'nin Belirlenmesi (Investigation of Equivalent Loads Affecting Floors)

Bu çalışmada seçilen taşıyıcı sistem modelleri için yukarıda deprem yönetmeliğindeki bağıntılar kullanılarak döşeme hizalarında katlara etkiyen yatay deprem kuvveti her taşıyıcı sistem modeli için ayrı ayrı hesaplanmıştır (Tablo 2).

Taşıyıcı sisteme etkiyen herhangi bir deprem doğrultusu için; binanın  $i$ 'inci katındaki düşey taşıyıcı elemanlarda, hesaplanan  $\delta_i$  etkin göreceli kat ötelemelerinin kat içindeki en büyük değeri  $(\delta_i)_{\max}$  yönetmelikte belirtildiği gibi aşağıda verilen koşulu sağlaması gerekmektedir [1].

$$(\delta_i)_{\max}/h_i \leq 0.02 \quad (2)$$

Tablo2.Katlara etkiyen eşdeğer deprem yükleri

Yapı Tipi	Kat Yeri	Katın Temel üst kotundan Yüksekliği (h <sub>i</sub> ) (m)	Katlara Etkiyen Eşdeğer Deprem Yükleri F <sub>i</sub> (kN)	Yapı Tipi	Kat Yeri	Katın Temel üst kotundan Yüksekliği (h <sub>i</sub> ) (m)	Katlara Etkiyen Eşdeğer Deprem Yükleri F <sub>i</sub> (kN)
1	2	3	4	5	6	7	8
Model 1	Z	3	214.89	Model 7	Z	3	245.64
	1	6	429.78		1	6	491.29
	2	9	642.53		2	9	734.48
	3	12	855.27		3	12	980.13
Model 2	Z	3	242.05	Model 8	Z	3	240.76
	1	6	486.55		1	6	481.52
	2	9	733.49		2	9	719.88
	3	12	975.55		3	12	960.64
Model 3	Z	3	252.45	Model 9	Z	3	240.84
	1	6	504.90		1	6	481.68
	2	9	757.35		2	9	720.11
	3	12	1007.28		3	12	960.95
Model 4	Z	3	263.65	Model 10	Z	3	241.77
	1	6	527.30		1	6	483.54
	2	9	788.31		2	9	722.90
	3	12	1051.97		3	12	964.67
Model 5	Z	3	249.28	Model 11	Z	3	239.86
	1	6	498.57		1	6	479.72
	2	9	745.36		2	9	717.18
	3	12	994.64		3	12	957.04
Model 6	Z	3	244.69				
	1	6	489.39				
	2	9	731.64				
	3	12	976.33				

Seçilen taşıyıcı sistem modelleri için yapılan hesap sonucu katların yaptıkları toplam yer değiştirmeler her bir taşıyıcı sistemlerin x ve y

yönleri için aşağıdaki tablolarda verilmiştir (Tablo 3). Tablodan görüldüğü gibi (2) bağıntısı sağlanmaktadır.

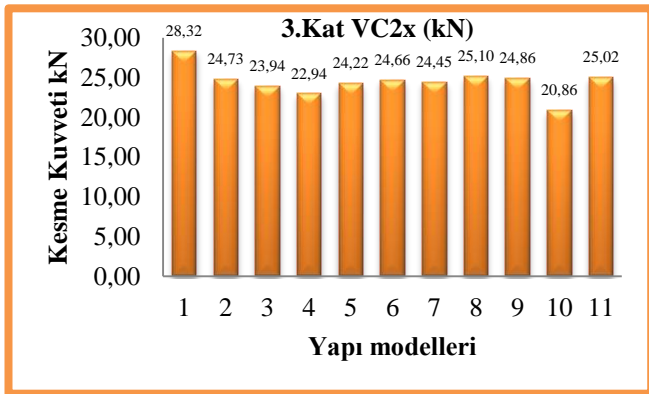
Tablo 3. Toplam yatay yer değiştirmeler

Yapı Model	Kat Yeri	Kat Deplasmanı Y yönü (m)	Kat Deplasmanı X yönü (m)	Yapı Model	Kat Yeri	Kat Deplasmanı X yönü (m)	Kat Deplasmanı Y yönü (m)
1	2	3	4	5	6	7	8
Model 1	Z	0.00072	0.00061	Model 7	Z	0.00092	0.00069
	1	0.00171	0.00145		1	0.00225	0.00164
	2	0.00253	0.00216		2	0.00338	0.00244
	3	0.00304	0.00260		3	0.00413	0.00294
Model 2	Z	0.00082	0.00069	Model 8	Z	0.00093	0.00083
	1	0.00192	0.00164		1	0.00225	0.00199
	2	0.00282	0.00242		2	0.00337	0.00296
	3	0.00336	0.00290		3	0.00410	0.00356
Model 3	Z	0.00084	0.00071	Model 9	Z	0.00104	0.00083
	1	0.00199	0.00168		1	0.00260	0.00199
	2	0.00295	0.00250		2	0.00394	0.00296
	3	0.00355	0.00301		3	0.00485	0.00356
Model 4	Z	0.00088	0.00074	Model 10	Z	0.00105	0.00083
	1	0.00208	0.00175		1	0.00260	0.00200
	2	0.00307	0.00260		2	0.00395	0.00297
	3	0.00370	0.00313		3	0.00487	0.00358
Model 5	Z	0.00084	0.00070	Model 11	Z	0.00106	0.00083
	1	0.00200	0.00167		1	0.00265	0.00198
	2	0.00297	0.00247		2	0.00403	0.00295
	3	0.00359	0.00298		3	0.00497	0.00355
Model 6	Z	0.00087	0.00069				
	1	0.00211	0.00164				
	2	0.00315	0.00243				
	3	0.00381	0.00293				

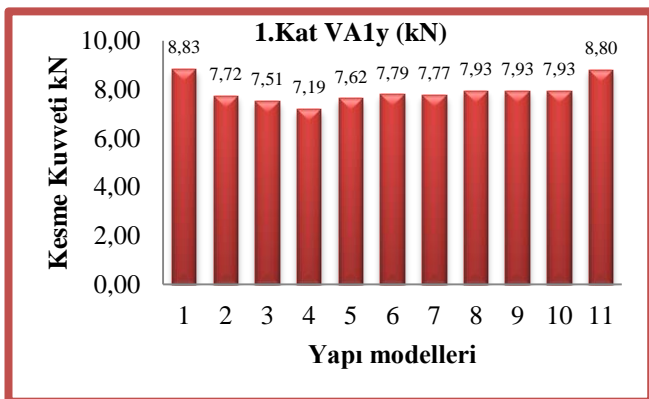
## 4.2. Kolonlarda Kesme Kuvveti ve Moment Değerlerinin Dağılımı (Distribution of Shear Force and Moment Values in Columns)

Bu çalışmada incelenen kolonların taşıyıcı sistemdeki yerleri; yapının dış cepesindeki dış köşeden (A1), köşelerden bir aks içerdeki kenar akslarından (B1) ve orta akslardan (C1, C2) seçilmiştir.

Elde edilen bu çalışma doğrultusunda, katlara gelen kesme kuvvetlerinin seçilen kolonlara dağılımı irdelenmiş olup, kesme kuvveti dağılımı yönlerine göre tüm yapı modellerinde incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda değişimi fazla olan C2 ve A1 kolonlarında meydana gelen kesme kuvvetleri grafik olarak aşağıda verilmiştir (Şekil 3 – Şekil 4).

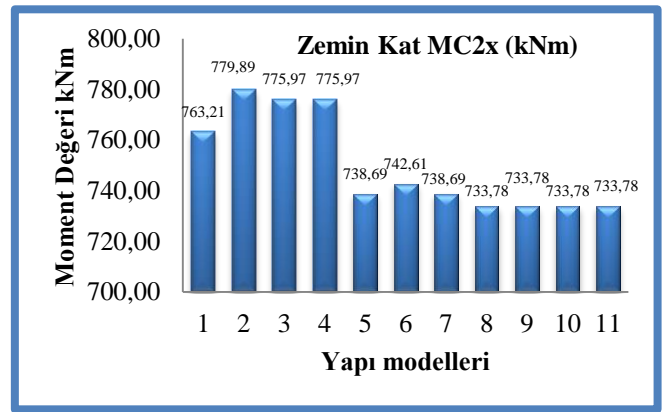


Şekil 3. C2 kolonlarında yapı modellerine göre x doğrultusunda kesme kuvveti değişimi

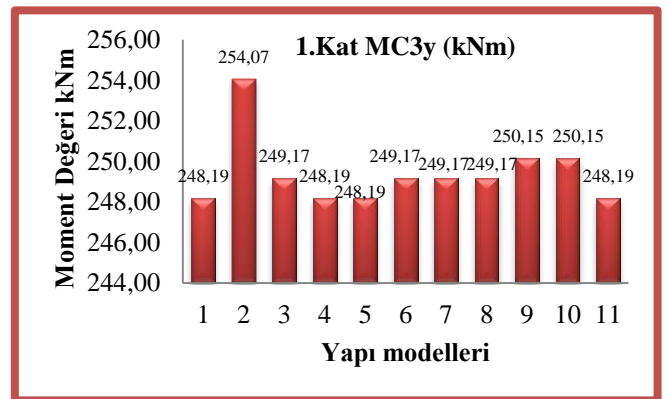


Şekil 4. A1 kolonlarında yapı modellerine göre y doğrultusunda kesme kuvveti değişimi

Seçilen kolonlara gelen moment değerlerinin yüzde olarak dağılımı tüm yapı modellerinde her iki yönde incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda değişimi fazla C2 ve C3 kolonlarında meydana gelen momentler grafik olarak aşağıda verilmiştir (Şekil 5 - Şekil 6).



Şekil 5. C2 kolonlarında yapı modellerine göre x doğrultusunda moment değişimi



Şekil 6. C3 kolonlarında yapı modellerine göre y doğrultusunda moment değişimi

## 5. DEĞERLENDİRMELER (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, plan üzerinde taşıyıcı sistemi birbirinden farklı 11 yapı modeli incelenmiştir. Ele alınan taşıyıcı sistem içerisinde kolon boyutları zemin katta kare kesitli kolonlar için 50cm/50cm, dikdörtgen kesitli kolonlar 50cm/80cm olarak seçilmiş olup her katta 5 cm küçültülerek son katta kare kolonlar 35cm/35cm, dikdörtgen kolonlar ise 35cm/80cm olmaktadır.

İncelenen yapıların, birinci derece deprem bölgesi olduğu, Z4 sınıfı elverişsiz zemin olduğu ve yapıların kullanım amacının konut veya işyeri olduğu varsayılmaktadır. Katlardaki kolonların kesitlerinin değişmesi sonucu meydana gelen kesme kuvveti, moment dağılımları incelenmiş ve toplam yatay yer değiştirmeleri araştırılmıştır. Bunun sonucunda ortaya çıkan sonuçlar aşağıda verilmektedir.

Bu çalışmada seçilen kolonların taşıyıcı sistemdeki yerleri; yapının dış cephesindeki köşeden, köşelerden bir aks içerideki kenar akslarından ve orta akslardan seçilmektedir.

Yapılan analizler sonucunda; yapının dış cephesindeki köşe aksındaki kolon zemin katlarda 50cmx50cm başlayıp diğer katlarda kesitleri küçülerek en üst katta 35cmx35cm olmaktadır. Kare kesitli köşe akslarındaki kolonların aldığı kesme kuvveti, bu kolonların yatay öteleme rijitliği azaldığı için aldığı kesme kuvveti de azalmaktadır. Moment değerleri zemin katta % 24 azalırken bu azalma oranının üst katlarda yaklaşık olarak %30'a çıktığı görülmektedir.

Köşe ve köşelerden bir aks içeri kenar akslarında bulunan kolonlar ise zemin katlarda 50cmx80cm başlayıp diğer katlarda küçülerek en üst katta 35x80 cm olmaktadır. Bu dikdörtgen kesitli kolonlarda kesme kuvveti x ve y doğrultusunda tüm modellerin zemin katlarında % 10'a varan bir artış gösterirken, üst katlarda ise bu artış oranı %45'e vardığı gözlemlenmektedir. Moment değerlerinin ise zemin katta %17'lik bir azalış gözlenirken bu değer üst katlarda bu değer % 28'lere ulaşmaktadır.

Orta akslardaki kare kolonlar, zemin katlarda 50cmx50cm başlayıp diğer katlarda kesitleri küçülerek 35cmx35cm olmaktadır. Kare kesitli orta aksındaki kolonlarda kesme kuvveti değeri zemin katlarda %10'a varan bir azalış göstermektedir.

Moment değerlerinde ise farklı modellerde yapının düzensizleşmesi sonucunda %40 azalma göstermektedir.

Plan üzerinde kolon-kiriş yerleşimi farklı 11 yapı tipinde kolon-kiriş yerlerinin değişmesi sonucunda, yapıların toplam yatay yer değiştirmelerine baktığımızda; zemin katta x yönünde oluşan yatay yer değiştirme, taşıyıcı sistemde düzenli bir yerleşime sahip Model 1'de 0.61 mm olurken kiriş süreksizliklerinin en fazla olduğu Model 11'de ise 0.83 mm olmaktadır. Zemin katta y yönünde oluşan yatay yer değiştirmelerin taşıyıcı sistemde düzenli bir yerleşime sahip Model 1'de 0.72 mm olurken kiriş süreksizliklerinin en fazla olduğu Model 11 de ise 1.06 mm olmaktadır. Bunun sonucunda;

yapılarda kolon-kiriş yerlerinin değişmesi ile süreksizliğin artması ile toplam yatay yer değiştirmelerin de buna bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Sonuç olarak; düşey taşıyıcı eleman olan kolonların plandaki yerleşimi ve boyutlarındaki değişimin kesme kuvveti dağılımına ve moment değişimine etkili olduğu görülmektedir. Burada, yapının dış cephesinde ve köşelerden bir aks içeri kenar aksları kadar olan kolonlarda kesme kuvveti daha fazla olduğu görülmüştür.

Taşıyıcı sistemlerin süreksizliklerinin simetrik olmaması sonucunda; toplam yatay yer değiştirmeler farklılık göstermiş olup, en büyük deplasmanlar sisteme simetrik olmayan süreksiz sistemlerde meydana gelmektedir.

Planda yatay taşıyıcı olan kirişlerin kaldırılması sonucunda; kirişlerin rijitleştirici etkisinden yararlanılmadığı durumlarda sistemde iç kuvvetlerde önemli bir değişim olmadığı görülmektedir.

Geçmiş yıllarda ülkemizde birçok yıkıcı depremler meydana gelmiştir ve iler ki senelerde de olacağı bir gerçektir. Bunun sonucunda da yine can ve mal kaybına uğrayacağımız tahmin edilmektedir. Taşıyıcı sistemi oluştururken Deprem Yönetmeliği ve TS500 standardını dikkate almalıyız. Bununla beraber düşey taşıyıcı elemanların eksenleri olabildiğince düzenli olmalıdır. Düşey yükler temele en kısa yoldan aktarılmalı ve kolonlar temele kadar kesintisiz devam etmelidir. Deprem etkisi en fazla alt katlarda olduğundan ani rijitlik değişimlerinden kaçınılmalıdır.

Taşıyıcı sistemin planda simetrik ve kiriş sistemlerinin kesintisiz sürekli bir şekilde düzenlenmesi, deprem sırasında oluşan etkileri önemli ölçüde azaltmaktadır.


## 6. KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007.
- [2] Kasap H., Özyurt Z., "Perde En Kesit Şeklinin ve Planda Perde Yerinin Değişmesinin, Perdeler ve Çerçeveler Arasındaki Kesme



Kuvveti Dağılımına Etkisi'', SAÜ Fen Bilimleri Enstitü Dergisi , Sakarya, 2002.

- [3] Celep Z., ve Kumbasar N.,“Deprem Mühendisliğine Giriş ve Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı ” , Beta Dağıtım, İstanbul, 2004.
- [4] Kasap H., Şahin Ö., “1975 Yönetmeliğine Göre Yapılmış Yapıların Yeni Deprem Yönetmeliğine Göre Performans Değerlendirmesi”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Kütüphanesi, Sakarya, 2009.
- [5] Gülay G., Bahçecioglu A., “ Planda Düzensiz Yapıların Deprem Etkileri Altındaki Davranışı ”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Kütüphanesi İstanbul, 2005.
- [6] Arslan M., Köroğlu M., Köken A. “Binaların Yapısal Performansının Statik İtme Analizi ile Belirlenmesi”, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Konya, 2008.
- [7] Özkul T.,Gezmiş M.,“Planda Taşıyıcı Sistemi Düzenli ve Düzensiz Olan Betonarme İki Yapının Davranışının İncelenmesi ”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Kütüphanesi İstanbul, 2012.
- [8] Öztürk T., Yılmaz T., “Betonarme Yapılarda Taşıyıcı Sistem ve Donatı Düzenleme İlkeleri ”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul, 2006.
- [9] Döndüren M., Karaduman A., Çöğürücü M., Altın M. “Yapılarda Burulma Düzensizliği”, Teknik-Online Dergisi Sayı 1-2007,Konya, 2007.
- [10] Özyurt Z., Kanıcı M.,“Betonarme Yapılarda A2 Türü Düzensizliği Üzerine Parametrik Bir İnceleme”, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Kütüphanesi, Sakarya, 2006.
- [11] ÖztürkT., Başarı A., “Döşeme Düzensizliklerinin Taşıyıcı Sistem Davranışlarına Etkisi ”, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Kütüphanesi, İstanbul, 2007.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 27.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 20.04.2017	<u>Doi:</u> 10.16984/saufenbilder.300751	

## Yatılı okul yatakhanelerinde iç hava kalitesi probleminin araştırılması ve yeni bir sistem geliştirilmesi

Mustafa Ertürk <sup>\*1</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada 2016 yılı aralık ayın da dokuz odalı ve altmış öğrenci kapasiteli yatılı bir mesleki ve teknik eğitim merkezi pansiyonu yatakhanelerindeki iç hava kalitesi problemleri araştırılmıştır. İki dış hava, dokuz mahal içerisinde olmak üzere Testo 535 CO<sub>2</sub> ölçüm cihazı ölçümler yapılmıştır. Dış hava CO<sub>2</sub> ölçümleri bina bahçesinde ve 2.katta koridorda bulunan pencere açılarak yapılmıştır. Diğer 9 ölçüm her mahalin insanlı bölgedeki farklı beş noktadan ortalamaları manuel olarak kayıt altına alınmıştır. Bu ölçümler aralık ayının dört farklı gününde ve yedi farklı saatte (15<sup>00</sup>, 16<sup>00</sup>, 18<sup>00</sup>, 20<sup>00</sup>, 22<sup>00</sup>, 00<sup>00</sup>, 03<sup>00</sup>, 06<sup>30</sup>) yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre Saat 15'te tüm odalarda CO<sub>2</sub> müsaade edilen CO<sub>2</sub> miktarının (1100 ppm) altında olduğu görülmektedir. Öğrencilerin yatakhanelere girmeye başlama saati 18'den itibaren 20' ye kadar stabil olarak CO<sub>2</sub> miktarının arttığı, Saat 9<sup>30</sup> dan 22<sup>00</sup>'a kadar serbest zaman olması öğrenci aktivasyonunu artırdığından CO<sub>2</sub> miktarını artırmakta, bu artış sabah 06<sup>00</sup>'a kadar devam etmektedir. Bu pansiyondaki iç hava kalitesi problemini çözmek için geliştirilen yeni bir sistemle, iç hava kalitesini sürekli kontrol ederek ortamdaki iç hava kalitesini stabil durumda tutması hedeflenmiştir. Sistem yatakhane içerisindeki CO<sub>2</sub> sensörünün ABB marka sürücüsüne bilgi aktarması ile taze hava ve egzoz havası fanlarını değişken hava debili sistem haline getirerek ortam içerisindeki havanın CO<sub>2</sub> miktarını sürekli olarak 1100 ppm olarak tutması, dış hava sıcaklığı 20°C indiğinde içeriye üflenecek taze havayı da kanal içerisinde bulunan elektrikli rezistansları da yüke göre devreye alarak içeriye üflenen hava sıcaklığının sürekli olarak 25 °C tutulması hedeflenmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** iç hava kalitesi, havalandırma, değişken hava debili sistem, yatılı okul, CO<sub>2</sub>

## Investigating the problems associated with interior air quality of bedrooms in boarding schools and developing a new system

### ABSTRACT

The problems associated with interior air quality in the dormitory of a vocational and technical training center that consist of six bedrooms with a capacity of sixty students are studied for December of 2016. Measurements are carried out with 11 Testo 535 CO<sub>2</sub> measuring instruments, two and nine of which are used for exterior and interior air, respectively. The outdoor CO<sub>2</sub> measurements are made in the garden and in front of open window situated at the second floor of the building. The data received from other nine measuring instruments placed at five different locations where the students are mostly present are recorded continuously and averaged manually. These measurements are conducted for seven different hours of four different days on December (15<sup>00</sup>, 16<sup>00</sup>, 18<sup>00</sup>, 20<sup>00</sup>, 22<sup>00</sup>, 00<sup>00</sup>, 03<sup>00</sup>, 06<sup>30</sup>). According to results obtained at 15<sup>00</sup>, it is found that the amount of CO<sub>2</sub> level in rooms is measured to 1100 ppm, which is under the permitted amount of level. Students begin to enter the bedrooms from 18<sup>00</sup>, the amount of CO<sub>2</sub> increase staidly to up to 20<sup>00</sup>. The free time of students from 9<sup>30</sup> to 22<sup>00</sup> increases the amount of CO<sub>2</sub> and continues until 06<sup>00</sup> in the morning due to their increased activities in this period of times. To solve the problem associated with interior air quality of this dormitory, a novel system which controls the interior air quality continuously and keeps it stabile is developed. In this newly developed system, it is aimed to keep the amount of CO<sub>2</sub> at 1100 ppm level by transferring the data collected from CO<sub>2</sub> sensors in bedrooms to ABB brand driver, and designing a variable air flow system that controls the fresh air and exhaust fans. This system is also expected to constantly stabilize the blown air

<sup>1</sup> Yazar 1 bilgileri Balıkesir, Balıkesir Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Balıkesir- mustafaerturk65@gmail.com

temperature at 25 °C by activating the electric resistances present in the air channel according to the load, when the outside air temperature drops below 20 °C.

**Keywords:** Indoor air quality, ventilation, variable air flow rate, boarding school, CO<sub>2</sub>

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tüm canlıların hayatlarını sürdürebilmesi için atmosfer havasındaki oksijene ihtiyacı vardır. İnsanlar 1 m<sup>3</sup> oksijen için 4,76 m<sup>3</sup> atmosfer havası teneffüs etmek zorundadır. Kapalı hacimlerde ısı kaybını azaltmak için infiltrasyon sızıntılarının önemli oranda düşürülmesi, binalarda estetik amaçlı kullanılan silikon, kurşun, vernik vb. esaslı malzemeler kapalı hacimlerin havalandırılmasını zorunlu hale getirmiştir.

Kapalı mekanlarda bazı bileşenler veya faaliyetlerden oluşabilen toksit kimyasallar bir çok kanser çeşidinden başka, baş ağrısı, öksürük, gözlerde yanma, baş dönmesi gibi rahatsızlıklara neden olabilmektedir.[1] Çocuklarda bağışıklık, solunum, sindirim, sinir ve üreme sistemleri gelişimlerini tamamlamamıştır. Dolayısıyla, henüz tam oluşmamış bazı anatomik bariyerler, organlarını ve gelişimlerini etkileyebilecek toksik maddelerin girişine izin verebilir; solunum yoluyla maruz kalınan Partikül Madde (PM)'nin ciğerlere ulaşma oranı yetişkinlere göre daha yüksek olabilir. Alerji ve alerjik astım ülkemiz de dahil olmak üzere gelişmekte olan ve gelişmiş ülkelerde yaygınlığı artan bir hastalıktır. Okullarda iç havada ölçülen kirleticilerin neredeyse tamamı astım ile ilişkilendirilmektedir [2].

## 2. KAPALI HACİMLERDE HAVA TÜKETİMİ (AIR CONSUMPTION IN CLOSED VOLUMES)

Kapalı hacimlerde iç hava kalitesi, iç ortamdaki hava temizliği ile ilgilidir. Bu hacimlerde iç hava kalitesi yönünden insanların farklı beklentileri ve farklı algılamalarından dolayı, iç hava kalitesi için kesin sınırlar belirlemek gerçekçi bir yaklaşım olmaz. Bu duruma açıklık getirmek için ASHRAE 62-1989, 2001 ve 2004 kabul edilebilir iç hava kalitesi standardı getirmiştir. Bu standart; içinde bilinen kirleticilerin, yetkili kuruluşlar tarafından belirlenmiş zararlı konsantrasyonlar seviyelerinde bulunmadığı ve bu hava içinde bulunan insanların %80 veya üzerindeki oranlarda havanın kalitesiyle ilgili herhangi bir memnuniyetsizlik hissetmediği havadır olarak

açıklamaktadır [3,4,5]. İç hava kalitesi ile bağlantılı olarak Kapalı Bina Sendromu, Hasta Bina Sendromu ve Bina Bağlantılı Hastalıklar olarak adlandırılan sağlık problemleri tanımlanmaktadır [6,7]. İç hava kalitesi ile ilgili yapılan araştırmaların çoğunda iç ortamdaki kirleticilerin seviyesi, dış ortama göre daha yüksek olduğu görülmüştür [8]. İç hava kalitesi değerlendirmelerinde İç ortamdaki sıcaklığı, bağıl nem, hava hızı, karbondioksit, solunabilir asıllı partikül madde, uçucu organik bileşikler, azot oksitler, karbonmonoksit, ozon, kükürtdioksit, radon, formaldehitler gibi parametreler ölçülerek iç hava kalitesinin durumu ve değerlendirilmesi yapılmaktadır [9-10]. İç hava kalitesini bozan kirleticiler iç ortam ve dış ortam kaynaklıdır. İç ortam kirlilik kaynaklarının başında insan gelmektedir. Bunun yanında iç ortamda bulunan halılar, mobilyalar, temizlik için kullanılan maddeler, sigara dumanı, soba dumanı ve çeşitli amaçlar için kullanılan alet ve cihazlar diğer iç kirleticilerdir. Dış ortam kirleticileri ise atmosfer havasındaki tozlar, polenler, araba egzozları ve endüstriyel kaynaklı havaya atılan kirleticiler olabilir. Dış ortam havasında bulunan kirleticiler, içeri verilen dış hava veya içeri sızan dış hava ile iç hava kalitesini olumsuz etkilerler. Sonuçta iç hava kalitesi düşük olan ortamlarda kirleticilere maruz kalan kişiler, alerji, enfeksiyon, zehirlenme ve yorgunluk gibi çeşitli sağlık problemleri ve rahatsızlıklar yaşarlar[11].

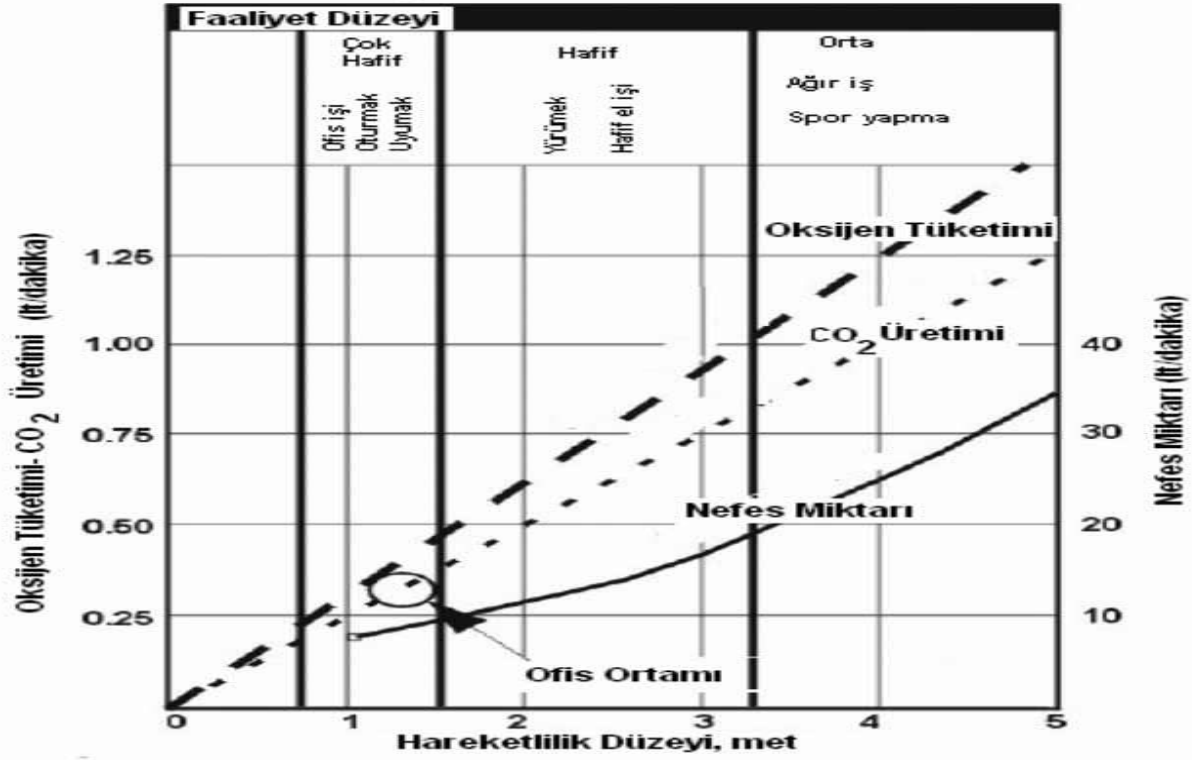
### 2.1 İnsan Faaliyet Türüne Göre Hava Tüketimi (Air Consumption By Human Activity Type)

Kapalı hacimlerde oksijen miktarı en az %11, karbondioksit oranı %3 olabilir. İnsanların çalışma aktivitelerinde oksijen alt sınırı %17~%18 civarında olmalıdır. 68 kg ağırlığındaki bir insan 24 saat boyunca 12m<sup>3</sup> (14,4 kg) hava solumaktadır [12]. Kapalı hacimlerde, insan faaliyet türüne göre iç havaya aktarılan CO<sub>2</sub> miktarı Tablo 1'de verilmiştir [13].

Tablo1. İnsan faaliyet türüne göre iç havaya aktarılan CO<sub>2</sub> miktarı (The amount of CO<sub>2</sub> transferred to internal air by human activity type)

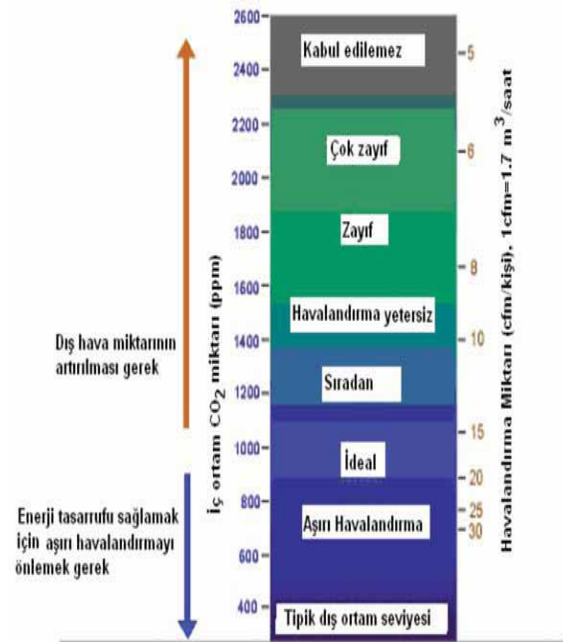
Durum	Faaliyet derecesi	CO <sub>2</sub> verişi miktarı (litre/saat)
Oturan	I	15
Elle hafif iş yapma	II	23
Elle iş yapma veya yavaş yürüme	III	30
Ağır iş yapma veya hızlı yürüme	IV	30

Faaliyet türüne göre nefes alma miktarı, oksijen tüketimi ve CO<sub>2</sub> üretim miktarı değişimi Şekil 1'de verilmiştir [14]. Şekilden CO<sub>2</sub> üretiminin ve nefes alma miktarının metabolik aktiviteye bağlı olduğu görülmektedir [10].



Şekil 1. Faaliyet türüne göre nefes alma miktarı, oksijen tüketimi ve CO<sub>2</sub> üretim miktarının değişimi (Variation of amount of breathing, oxygen consumption and CO<sub>2</sub> production according to human activity type)

Kapalı hacimlerde CO<sub>2</sub> miktarı, 900- 1100 ppm'e kadar ideal olduğu bu miktarın arttıkça iç hava kalitesinde oksijen fakirliği CO<sub>2</sub> zenginliği olduğu Şekil 2'de gösterilmiştir [6].



Şekil 2. Karbondioksit seviyesi ile havalandırma arasındaki ilişki (Relationship between carbon dioxide level and ventilation)

### 3. HAVALANDIRMA YÖNTEMLERİ (VENTILATION METHODS)

Havalandırma kapalı bir hacimde insanlar ve çeşitli maddeler tarafından çıkarılan gazların tabii veya cebri olarak egzoz edilip yerine cebri veya tabii olarak taze hava gönderme işlemidir. Günümüzde binaların yapımında estetik ve yalıtım amaçlı kullanılan malzemelerin dış duvarlardaki hava akışını kısıtlaması, enerji ekonomisi nedeniyle pencerelerden infiltrasyon sızıntısının %10'lara inmesi, iç mekanlarda silikon esaslı üst yüzey malzemeleri kullanılması, eşya veya yapı malzemelerinden yayılan gazlar, sigara kokusu, çiğlenmeden dolayı dış duvarlara bakan iç duvar yüzeylerinde küf oluşumu iç hava kalitesinin düşmesine, üst solunum yolu enfeksiyonu ve romatizmal hastalıklar gibi sağlık problemlerine neden olmaktadır. Havalandırma yöntemlerini doğal ve mekanik olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür[16].

#### 3.1 Doğal Havalandırma (Natural Ventilation)

Doğal havalandırma baca ve rüzgar etkisi ile gerçekleşir. Kapalı ortamların üst kısımlarına konulan menfezler baca ile irtibatlandırıldığı da rüzgar baca içerisinde bir vakum oluşturarak pencere ve kapılardan sızan taze hava kadar havayı egzoz eden sistemdir. Kirlilik seviyesinin düşük olduğu sistemlerde tercih edilir.

#### 3.2 Mekanik(cebri)Havalandırma (Mechanical Ventilation)

Taze ve egzoz havalarının vantilatör ve/veya aspiratör olarak çalışan bir fan tarafından zoraki gerçekleştirilmesidir. Üç değişik yöntemle mekanik havalandırma yapılabilir.

##### 3.2.1 Mekanik giriş doğal çıkış (Mechanical input natural output)

Mahal içerisine vantilatörle taze hava gönderilip kirliliğin de pozitif basınç etkisiyle baca, kapı ve pencerelerden egzoz edilme işlemidir.

##### 3.2.2 Doğal giriş mekanik çıkış (Natural input mechanical output)

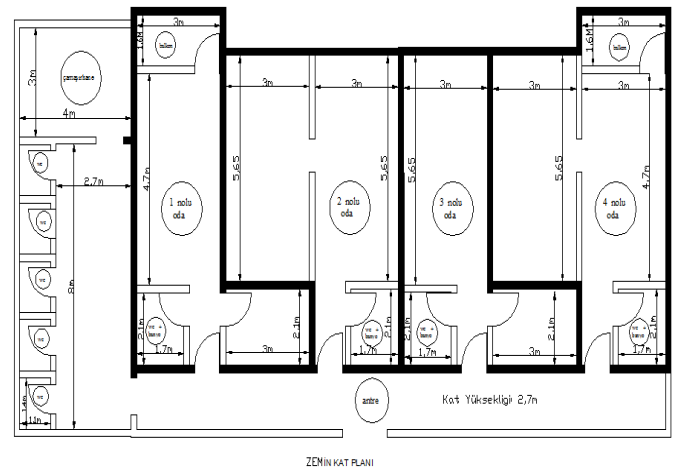
Bacaya takılan bir aspiratör vasıtasıyla mahalde meydana gelen negatif basınç nedeniyle kapı ve pencere aralıklarından giren taze hava ile gerçekleştirilen sistemdir.

##### 3.2.3 Mekanik giriş ve çıkış (Mechanical input and output)

İnsanların kalabalık olarak uzun süre yaşamak zorunda oldukları hacimlerin havalandırılmasında kullanılan bu sistemde vantilatör tarafından ortama taze hava üflenerek kirliliğin aspiratör tarafından egzoz edilme işlemidir.

### 4. YATILI MESLEKİ VE TEKNİK EĞİTİM MERKEZİ PANSİYONUNDA İÇ HAVA KALİTESİNİN ARAŞTIRILMASI (INVESTIGATION OF INTERIOR AIR QUALITY IN BOARDING VOCATIONAL AND TECHNICAL EDUCATION CENTER)

Bu çalışmada, 2016 yılı aralık ayında Mesleki ve Teknik Eğitim Merkezi yatılı öğrenci yurdu iç hava kalitesi problemleri araştırılmıştır. Bu yurt binası toplam 3 katlı olup zemin kattta 1,2,3,4 numaralı yatakhane, 1 katta 5,6,7,8 numaralı yatakhane, 2 katta 12 numaralı yatakhaneler bulunmaktadır. Bu pansiyonun plan görünüşleri Şekil 1,2,3'te verilmiştir. Yatakhanelerde ikişerli ranzalarda toplam 6 veya 8 Öğrenci bulunmaktadır.

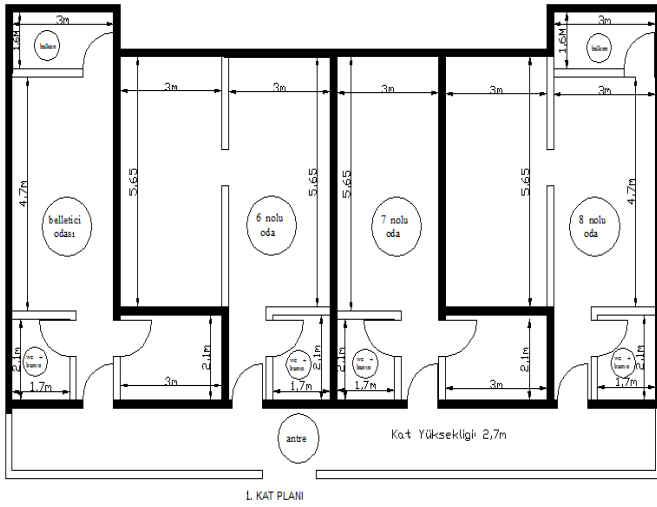


Şekil 3. Zemin kat planı (Ground floor plan)

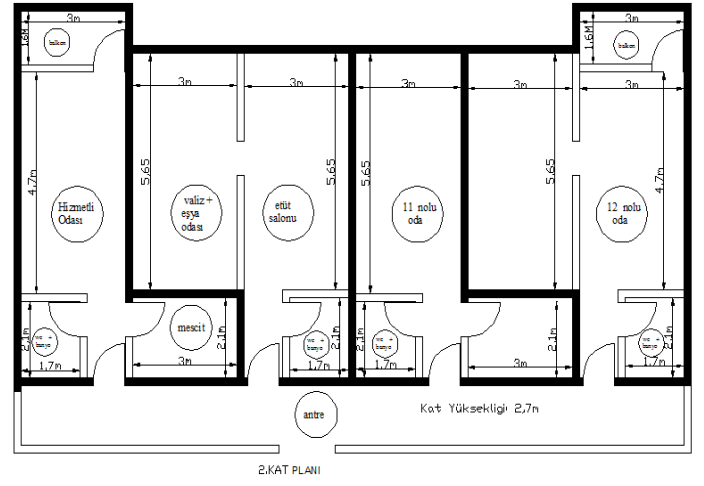
#### 4.1 Ölçüm sonuçlarının açıklanması (The interpretation of results)

Çalışma da ikisi dış hava, dokuz mahal içerisinde olmak üzere on bir farklı yerde CO<sub>2</sub>

miktarları ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Tablo 2.6'da verilmiştir.



Şekil 4. Birinci kat planı (1st floor plan)



Şekil 5. İkinci kat planı (2nd floor plan)

Tablo 2. Birinci ölçüm sonuçları (1st Measurement results)

ÖLÇÜM YAPILAN MAHALLER	01-12- 2016'DA ÖLÇÜM YAPILAN SAATLER							KİŞİ SAYISI
	15 <sup>00</sup>	18 <sup>00</sup>	20 <sup>00</sup>	22 <sup>00</sup>	00 <sup>00</sup>	03 <sup>00</sup>	06 <sup>30</sup>	
1 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	596	1012	1325	2855	2265	2996	3025	6
2 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	785	1325	1714	2221	2565	3048	3125	8
3 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	601	1125	1612	2101	2458	3012	3099	6
4 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	525	1096	1458	2965	2356	3725	3998	8
5 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	488	992	1181	1489	1771	1996	2002	2
6 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	588	1101	1313	1819	2077	2725	2985	8
7 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	613	1255	1841	2713	2993	3255	3885	6
8 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	598	999	1555	2120	2855	3125	3332	8
12 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	674	1610	2365	2912	3222	4077	4412	8
Zemin kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı(ppm)	389	441	488	493	512	529	529	-
2. kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	395	449	501	513	540	557	552	-

Tablo 3. İkinci ölçüm sonuçları (2nd Measurement results)

ÖLÇÜM YAPILAN MAHALLER	07-12- 2016'DA ÖLÇÜM YAPILAN SAATLER							KİŞİ SAYISI
	15 <sup>00</sup>	18 <sup>00</sup>	20 <sup>00</sup>	22 <sup>00</sup>	00 <sup>00</sup>	03 <sup>00</sup>	06 <sup>30</sup>	
1 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	621	1042	1610	2255	2813	2990	3211	6
2 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	701	1316	1825	2396	2801	3212	3499	8
3 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	669	1601	1992	2625	3002	3622	3992	6
4 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	525	1196	1628	3212	2992	3722	4012	8
5 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	493	988	1091	1322	1591	1802	1995	2
6 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	557	1411	1622	2158	2488	3112	3523	8
7 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	597	1052	1783	2666	3520	4100	4652	6
8 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	512	1118	1855	2541	3001	3255	3962	8
12 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	611	1519	2210	2689	3521	4001	4322	8
Zemin kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	396	423	457	478	499	525	527	-
2. kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	412	428	469	492	514	533	558	-

Tablo 4. Üçüncü ölçüm sonuçları (3rd Measurement results)

ÖLÇÜM YAPILAN MAHALLER	15-12- 2016'DA ÖLÇÜM YAPILAN SAATLER							KİŞİ SAYISI
	15 <sup>00</sup>	18 <sup>00</sup>	20 <sup>00</sup>	22 <sup>00</sup>	00 <sup>00</sup>	03 <sup>00</sup>	06 <sup>30</sup>	
1 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	617	1137	2034	2013	2223	2802	2896	6
2 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	805	1210	2065	5002	2467	3370	2910	8
3 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	580	1181	1461	2325	2764	3585	3601	6
4 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	576	1665	2562	1369	2560	2022	2052	8
5 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	480	980	1173	1730	1560	1147	1660	2
6 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	532	1147	1844	1628	3072	5157	5210	8
7 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	489	1380	1340	1593	2355	3140	3491	6
8 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	497	1013	1516	1704	2470	2767	2896	8
12 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	786	1160	2220	2530	3485	6183	6380	8
Zemin kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	389	451	412	529	552	528	430	-
2. kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	406	466	425	563	573	596	552	-

Tablo 5. Dördüncü ölçüm sonuçları (4th Measurement results)

ÖLÇÜM YAPILAN MAHALLER	22-12- 2016'DA ÖLÇÜM YAPILAN SAATLER							KİŞİ SAYISI
	15 <sup>00</sup>	18 <sup>00</sup>	20 <sup>00</sup>	22 <sup>00</sup>	00 <sup>00</sup>	03 <sup>00</sup>	06 <sup>30</sup>	
1 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	596	1042	1215	1640	1764	2640	2890	6
2 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	725	1305	1370	1435	2170	3125	3565	8
3 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	596	1078	1113	1276	1890	2125	2525	6
4 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	641	953	1099	1350	1918	2320	2465	8
5 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	495	795	1201	1571	1741	1910	1988	2
6 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	556	1056	1752	2185	2483	2885	3214	8
7 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	572	1101	1215	1325	1790	3125	3325	6
8 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	512	998	1552	1791	2185	2910	3001	8
12 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	695	1320	1756	1993	2850	3585	3622	8
Zemin kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	412	423	443	477	493	508	515	-
2. kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	429	455	473	504	532	539	548	-

Tablo 6. Beşinci ölçüm sonuçları (5th Measurement results)

ÖLÇÜM YAPILAN MAHALLER	29-12- 2016'DA ÖLÇÜM YAPILAN SAATLER							KİŞİ SAYISI
	15 <sup>00</sup>	18 <sup>00</sup>	20 <sup>00</sup>	22 <sup>00</sup>	00 <sup>00</sup>	03 <sup>00</sup>	06 <sup>30</sup>	
1 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	628	1011	1147	1894	1536	2888	2912	6
2 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	697	1023	1179	1426	1783	2458	2696	8
3 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	593	1018	1140	1765	1354	2152	2229	6
4 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	546	1085	1120	2795	2012	2963	3025	8
5 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	499	989	1127	1292	1502	2001	2055	2
6 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	563	1002	1384	1276	2063	2857	2996	8
7 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	512	1096	1254	2049	2262	3012	3123	6
8 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	536	1185	1710	2600	2276	2984	3099	8
12 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	693	1258	1722	2857	2559	3212	3585	8
Zemin kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	425	456	472	485	487	529	496	-

2. kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	432	475	508	531	537	541	499	-
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

Aralık ayının beş farklı gününde yedi farklı saatte (15<sup>00</sup>, 16<sup>00</sup>, 18<sup>00</sup>, 20<sup>00</sup>, 22<sup>00</sup>, 00<sup>00</sup>, 03<sup>00</sup>, 06<sup>30</sup>) alınan ölçüm sonuçları ortalamaları Tablo 7’de verilmiştir

Tablo.7 Ortalama ölçüm sonuçları (Average measurement results)

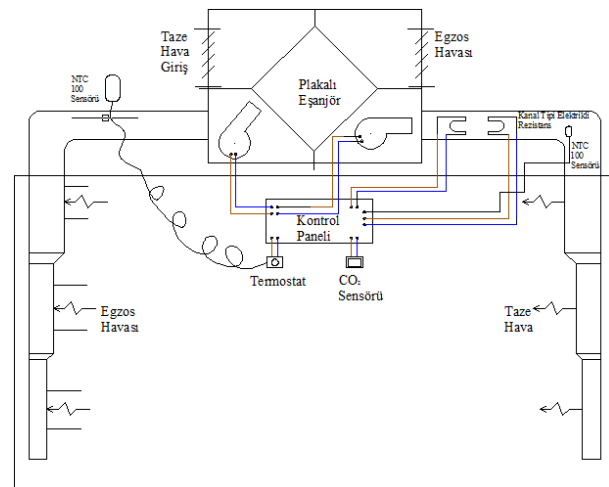
ÖLÇÜM YAPILAN MAHALLER	DÖRT ÖLÇÜME GÖRE ORTALAMA SONUÇLAR							KİŞİ SAYISI
	15 <sup>00</sup>	18 <sup>00</sup>	20 <sup>00</sup>	22 <sup>00</sup>	00 <sup>00</sup>	03 <sup>00</sup>	06 <sup>30</sup>	
1 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	641,0	1049	1466	2131	2120	2863	1925	6
2 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	742,6	1236	1631	2496	2357	3043	2153	8
3 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	607,8	1201	1464	2019	2294	2899	1975	6
4 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	562,6	1199	1574	2338	2368	2951	2086	8
5 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	491	948,8	1155	1481	1633	1771	1398	2
6 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	559,2	1145	1583	1813	2437	3347	2065	8
7 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	556,6	1177	1487	2069	2584	3327	2129	6
8 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	531	1063	1638	2151	2557	3008	2083	8
12 Numaralı oda CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	691,8	1374	2055	2596	3127	4212	2673	8
Zemin kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	402,2	438,8	454,4	492,4	508,6	523,8	483,6	-
2. kat dış hava CO <sub>2</sub> miktarı (ppm)	414,8	454,6	475,2	520,6	539,2	553,2	508,5	-

Tablo 7’de görüleceği üzere zemin kattaki dış hava CO<sub>2</sub> miktarının ve 2 kattaki dış hava CO<sub>2</sub> miktarı yedi ölçüm sonucuna göre de düşük çıktığı görülmektedir. Yaklaşık 6 m yükseklikte dış hava CO<sub>2</sub> miktarının yüksek çıkması dikkat çekmektedir. Bu okulumuzun bulunduğu yerde 7 ölçüm sonucuna göre de dış hava CO<sub>2</sub> miktarının düşük çıkması sevindirici bir gelişmedir.

Bu bina öğrencilerin sabah yatakhanelerden ayrılmasıyla düzenli olarak pencereler açılarak öğleden sonra havalandırılmaktadır. Tablodan görüleceği üzere Saat 15’te tüm odalarda CO<sub>2</sub> müsaade edilen CO<sub>2</sub> miktarının altında olduğu (1100 ppm) görülmektedir. Öğrencilerin yatakhanelere girmeye başlama saati 18’den itibaren 20’ye kadar stabil olarak CO<sub>2</sub> miktarının arttığı, Saat 9<sup>30</sup> dan 22<sup>00</sup>’a kadar serbest zaman olması öğrenci aktivasyonunu artırdığından CO<sub>2</sub> miktarını artırmakta, bu artış sabah 06<sup>00</sup>’a kadar devam etmektedir. 06<sup>00</sup>’da kahvaltı hazırlıkları başladığı için odadaki öğrenci sayısı azalması CO<sub>2</sub> miktarını düşürmektedir.

## 5. YÜKE GÖRE SICAKLIK VE CO<sub>2</sub> KONTROLLU HAVALANDIRMA SİSTEMİ (TEMPERATURE AND AMOUNT OF CO<sub>2</sub> CONTROLLED SMART VENTILATION SYSTEM BY LOAD)

Bu pansiyondaki iç hava kalitesi problemini çözmek için geliştirilen sistem Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. Yüke göre sıcaklık ve CO<sub>2</sub> kontrollü havalandırma sistemi (Temperature and amount of CO<sub>2</sub> Controlled Smart Ventilation System By Load)



Bu sistemin iç hava kalitesini sürekli kontrol ederek ortamdaki iç hava kalitesini stabil durumda tutması hedeflenmiştir. Sistem yatakhane içerisindeki CO<sub>2</sub> sensörünün ABB marka sürücüsüne bilgi aktarması ile taze hava ve egzoz havası fanlarını değişken hava debili sistem haline getirerek ortam içerisindeki havanın CO<sub>2</sub> miktarını sürekli olarak 1100 ppm olarak tutması, dış hava sıcaklığını sürekli olarak izleyen sıcaklık hissedici ve termostat dış hava sıcaklığı 20°C indiğinde içeriye üflenecek taze havayı kanal içerisinde bulunan iki adet (2000 W ve 3000W) elektrikli rezistanslar yüke göre devreye alarak içeriye üflenen hava sıcaklığının sürekli olarak 25 °C tutulması hedeflenmektedir.

Saat 22' den sonra tüm odalarda CO<sub>2</sub> miktarının müsaade edilen seviyenin üzerinde olması ortam havalandırılmasını kaçınılmaz hale getirecektir. Sistemde egzoz edilen havanın ısını, dış havadan alınan taze havaya transfer etmek için plakalı ısı eşanjörü mevcuttur. Plakalı eşanjör yardımıyla en az %50 oranında enerji tasarrufu hedeflenmektedir.

Bu çalışmada makale metninin uzamaması için havalandırma kanalı projesine girilmemiştir.

## 6.SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Havalandırma sistemi bulunmayan bu okulumuzda ASHRAE standartlarının üzerinde CO<sub>2</sub> miktarı çıkmıştır. Yatakhanelerde, geliştirilen bu sistemle ASHRAE standartlarına göre CO<sub>2</sub> miktarı ve konfor sıcaklığının ± % 5 hata payıyla tutulabileceği düşünülmektedir. Sistemin dış hava sıcaklığı sensörü (NTC100) ile kanal çıkışındaki sensörüyle (NTC100) haberleşmesi kanal içerisinde bulunan rezistansları değişken kapasiteli olarak devreye almaktadır. Mahal içerisindeki CO<sub>2</sub> miktarında karbondioksit sensörü - kontrol ünitesinin haberleşmesi ile üfleme ve egzoz fan devir sayılarını kontrol edip sistemi yüke göre çalışan değişken hava debili sistem haline getirmektedir. Ayrıca plakalı ısı geri kazanımla %50 oranında elektrikli rezistansların tüketeceği enerji miktarının azaltılabileceği hedeflenmektedir.

Yatakhanelerde iç hava kalitesi ölçümlerine göre, CO<sub>2</sub> miktarının havalandırma için yeterli bir parametre olduğu görülmüştür. Mahal içerisindeki CO<sub>2</sub> miktarı ölçüm yapılan tüm saatlere göre değişkenlik göstermektedir. Geliştirilen bu sistemle günün her saatinde iç hava kalitesinin stabil olması öğrencilerin gün boyunca öğrenme kabiliyetlerini artıracak, sistemin çalışma ve durma sayıları sınırlı olacağı için enerji tasarrufu da sağlanmış olacaktır.



Yatılı okullarda eğitim kalitesinin artması için mutlaka değişken kapasiteli havalandırma sistemleri bina yapımından önce tasarlanmalıdır. Klasik havalandırma sistemleri öğrenciler üzerinde ters etki oluşturabileceği gibi enerji israfına da neden olabilir.

Milli Eğitim Bakanlığımızın yeni yaptırmış olduğu okulların depreme dayanıklılığı, tek tip okul sistemi yerine iklimsel ve coğrafik şartları dikkate alarak yeni modern binalar yapması takdire şayan bir gelişmedir. Bakanlığımızın yeni yapılacak eğitim binalarında (ana okullarından üniversiteye kadar) akıllı havalandırma sistemlerine uygun projeler üretmesi öğrenim kalitesini artıracaktır.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Öztürk. M., Güvensan, A., Yücel, E, "İç Mekanlardaki Kirlilik Sorunu ve Bitkilerin Rolü," Yanma ve Hava Kirliliği İkinci Ulusal Sempozyumu, Anadolu Üniversitesi 1994, s.287-295.
- [2] A. Maeseno, "Indoor Air Quality and Sources in Schools and Related Health Effects," Journal of Toxicology and Environmental Health-Part B-Critical Reviews, 16, 491-550, 2013.
- [3] ASHRAE, "Standard 62- 1989- Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality," American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 1989.
- [4] ASHRAE, "Standard 62- 2001- Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality," American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2001.

- [5] ASHRAE, “Standard 62.1-2007 user's manual,” Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2007. Controlled Ventilation Using”ASHRAE Standard 62: Optimizing Energy Use and Ventilation, ASHRAE Transactions, 104(2), 1213-1225, 1998.
- [6] Bas. E, “Indoor Air Quality-A Guide for Facility Managers,” The Fairmont Pres, 2004. [17] Ertürk. Mustafa, “Havalandırma Sistem Tasarımı,” III.Uygulamalı İklimlendirme ve Soğutma Semineri Balıkesir Üniversitesi, 6 -10.
- [7] Schramek. E, “Recknagel-Sprenger Schramek - Isıtma ve Klima Tekniği El Kitabı,” TTMD, Ankara. 1999.
- [8] Montgomery. D.D, Kalman. D.A, “Indoor/Outdoor Air Quality”: Reference Pollutant Concentrations in Complaint-Free Residences, Applied Industrial Hygiene, 4 ,17-20, 1988.
- [9] Kreider. J.F, Rabl. A, “Heating and Cooling of Buildings-Design for Efficiency,” McGraw-Hill Inc., 1994.
- [10] Bulut. H, “Isıtma Sezonunda Ofislerde İç Hava Kalitesinin Araştırılması,” İklim 2007- II. Ulusal İklimlendirme Kongresi Bildiriler Kitabı, 285-295, Antalya, 2007.
- [11] Bulut. H, “Konutlarda İç Hava Kalitesi İle İlgili Ölçüm Sonuçlarının Analizi,” Teskon 2007 VIII. Ulusal Tesisat Muhendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, 415-427, İzmir, 2007.
- [12] Bulut. H, “ Havalandırma ve İç Hava Kalitesi Açısından CO<sub>2</sub> Miktarının Analiz,” Teskon 2011 X. Ulusal Tesisat Muhendisliği Kongresi Bildiriler Kitabı, 1679-1889, İzmir, 2011.
- [13] W. Tan and B. Khoshnevis, “Integration of process planning and schedulin: a review,” *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 11, no. 1, pp. 51–63, 2000.
- [14] Borat. O, Balcı. M, Sürmen. A.S, “Hava Kirlenmesi ve Kontrol Tekniği,” Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Ankara, 1992, s.1-4.
- [15] Doğan. H, “Uygulamalı Havalandırma ve İklimlendirme Tekniği,” Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2002.
- [16] Schell. M. B, Turner. C, Omar. S, “Application of CO<sub>2</sub> -Based Demand-

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 07.04.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 24.04.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.304422	

## Kazıklı iksa sistemi ile şev duraylılığının sağlanması

Ertan BOL<sup>1</sup>, Sedat SERT<sup>2</sup>, Aşkın ÖZOCAK<sup>\*3</sup>

### ÖZ

Bu makalede stabilitesi her aşırı yağış sonrasında bozulan, üzerinde devamlı kullanılan bir yol ile evler bulunan bir yamacın güvenliğinin sağlanması için kullanılan kazıklı iksa sistemi açıklanmıştır. Kazıklı iksa sistemi Sakarya ili, Karapürçek İlçesi, Kanlıçay Mevkii güney batı yamacında bulunan yol üzerinde gerçekleşmiş heyelanı önlemek için kullanılmıştır. Yaklaşık olarak 35-40 metre genişlik ve 60-65 metre uzunluğa sahip olan zemin kitlesinde hareketin farklı zamanlarda gerçekleştiği, özellikle yağın yağmurlar sonucunda hareketin şiddetinin arttığı beyan edilmektedir. Çalışma alanında toplam derinliği 29.5 metre olan 3 adet dönel sondaj gerçekleştirilmiştir. Sondajlardan alınan numuneler üzerinde heyelan incelemesine yönelik olarak fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda alanda meydana gelen harekete zemin ortamında boşluk suyu basınçlarının yükselmesinin neden olduğu anlaşılmıştır. Yürütülen heyelan analizleri sonucunda hasar gören yolun kazıklı sistem üzerine oturtulacak konsol duvar ile çözümlenebileceği kanısına varılmış ve imalat gerçekleştirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Heyelan, boşluk suyu basıncı, kazık, konsol duvar

## Ensuring slope stability with piled retaining system

### ABSTRACT

This article describes a piled retaining system, which was used to ensure the safety of a slope. There is a frequently used road and a house on the slope and the stability of the slope is under threat after every heavy rainfall. The piled system was used to prevent landslides, which have occurred on the road, in the south-western slopes of the Kanlıçay Location, in Karapürçek County, Sakarya Province. Soil mass, which has been moving at different times, is approximately 35-40 meters wide and 60-65 meters long. Three rotary drillings, having a total depth of 29.5 m, were carried out in the study area. Physical and mechanical tests were conducted on the samples taken from borings for the landslide investigation. As a result of investigations, it has been found that the landslide occurred because of the increase in pore pressures. The results of the slope stability analysis showed that the road and houses can be protected by using a cantilever retaining wall, which is settled on the piled system.

**Keywords:** Landslide, pore water pressure, pile, cantilever wall

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, ebol@sakarya.edu.tr

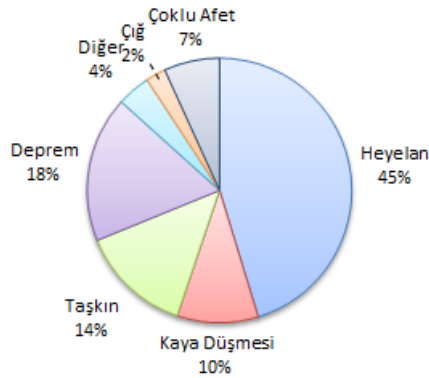
<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, sert@sakarya.edu.tr

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>3</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, aozocak@sakarya.edu.tr

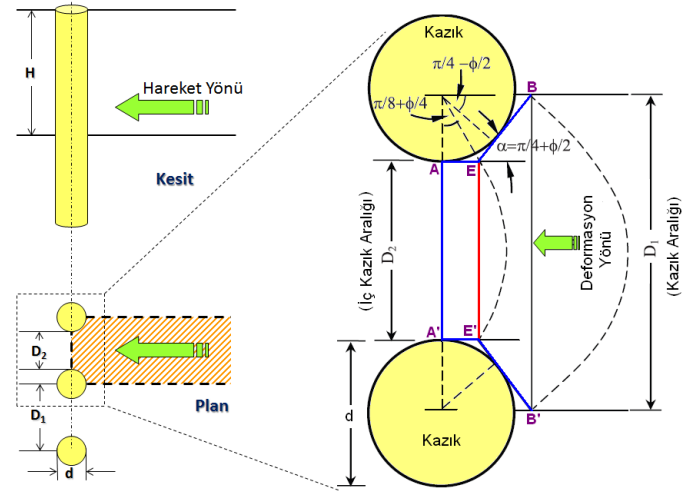
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Karadeniz, Doğu Anadolu ve Orta Anadolu Bölgeleri ülkemizde heyelanların sıkça geliştiği alanları içermektedir. Karadeniz Bölgesinin tamamı ve Doğu Marmara Bölgesi çok farklı jeolojik birimlerden oluşsa da hemen her tür eğimli ortamda özellikle de yağışların etkisiyle sıklıkla kitle hareketleri meydana gelmektedir. Son yıllarda genişleyen yerleşim alanlarında insan hataları nedeniyle de söz konusu heyelan sayılarının artışta olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. Gökçe vd. (2008)' nin çalışmasına göre Türkiye' de afet türüne göre olay sayısı dağılımı Şekil 1' deki gibidir [1]. Buna göre can ve mal kayıplarına yol açan heyelanların toplam afetler içinde en büyük dilimi oluşturduğu görülmektedir. Bununla birlikte kaya düşmeleri de bu grup içine alınırsa durum daha da kötüleşmektedir.



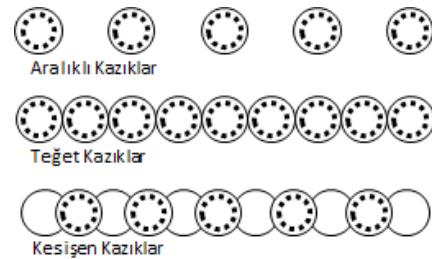
Şekil 1. Türkiye' de afet türüne göre olay sayısı dağılımı (Gökçe vd., 2008)

Çoğu doğal ancak azımsanmayacak bir kısmı da insan eliyle yapay olarak oluşabilen heyelanların etkilerini ortadan kaldırmak için birçok yöntem bulunmaktadır. Bunlardan bir kısmı geçici (kozmetik) olarak nitelendirilirken bir kısmı da kalıcı olarak uygulanmaktadır. Şev duraylılığının sağlanmasında kullanılan yöntemlerden biri de kazıklı sistemlerin kullanılmasıdır. Kazıklı sistemin davranışı Ito ve Matsui (1975) tarafından Şekil 2' deki gibi açıklanmıştır [2]. Buna göre; hareket eden kil ayrık kazıkların arasından akıp geçmek durumundadır. Kazıklar buna rijitlikleri ile direnirken zemin de iki kazık arasında kemerlenmektedir. Zemin AEB ve A'E'B' boyunca plastik dengeye erişmiş olarak kaymakta ve EE' düzlemi aktif basınç almaktadır.



Şekil 2. Kazıklı sistemin davranışı [2]

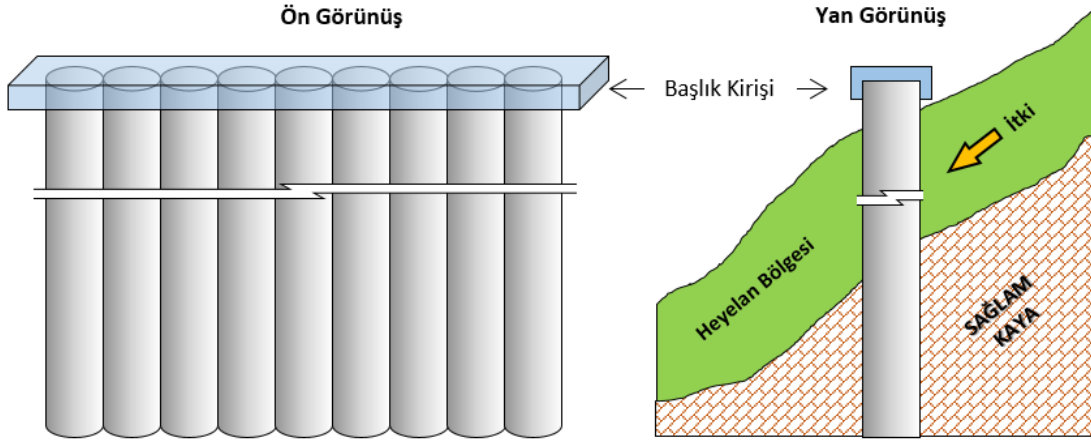
Yöntemin başarısı farklı araştırmacılar tarafından da açıklanmıştır [2] [3] [4] [5]. Pasif kazıklar pahalı bir yöntem olmasına rağmen bazen tek çare olarak çözüm sunmaktadırlar. Kayan bir cisim durdurmak veya hareketini yavaşlatmak için önüne bir başka ağır cisim koymak insanın içgüdüsel yaklaşımıdır. Kitle hareketlerini, önüne ağır bir duvar yaparak kontrol etme işlemi de çok uzun süre mühendisin aklına gelen ilk çare olmuştur. Yapısal önlemler duraylılığa direnen kuvvetleri artırarak katkıda bulunur. 1960' lı yıllara gelindiğinde duvarlı sistemlerin büyük kitle hareketlerini durduramadığı anlaşılmıştır. Özellikle gereken desteği zeminde herhangi biçimde kazı yapmadan sağlama zorunluluğu pasif olarak da adlandırılan yanal kazıkların heyelan uygulamalarında kullanılmasını gündeme getirmiştir. Önceleri çakma kazıkla yapılan uygulama günümüzde yerinde yapılan delme kazıklarla gerçekleştirilmektedir [6]. Yanal yüke maruz kazıklar; tercihan çapı 1 m' den az olmayan kazıklardan boyutları 6 m x 4 m' ye büyüyelebilen kesonlara kadar değişen betonarme yapı elemanlarıdır. Sistem, genelde bir başlık ile birleştirilmiş ve özellikle killerde uygulanan ayrık, gerektiğinde teğet ve tam ankastre kazıklardan oluşturulur (Şekil 3).



Şekil 3. Heyelan önlemede kullanılan farklı kazık yerleşimi uygulamaları

Pasif kazıklara ankraj uygulaması da söz konusu olabilmektedir. Pasif kazıklı perdelerin boyu sağlam tabakanın bulunabilmesi için gerektiğinde 30 m' ye kadar uzatılabilmektedir. Bu denli uzun kirişte belirecek kesme kuvveti ve momentler çok yüksek olacağından maliyet uzunluğun karesi ile yükselecektir. Betonarme kazıklardan daha hızlı imal edilebilen ve çok daha düşük maliyetli jet-grout kolonlarının heyelanlarda uygulanmaları henüz tartışmalıdır [6].

Pasif kazık uygulaması Türkiye' de artık sıkça yapılmakta olup birçok heyelan bu yöntemle durdurulmuştur. İzmir Seferihisar' da bir sitede geriye doğru çok hızlı gelişen heyelanın sitenin hasar görmemiş kesimini etkilememesi için 1.2 m çaplı, 25 m boylu ayırık betonarme kazık uygulaması yapılmış ve kesin başarı sağlanmıştır [6]. Şekil 4' te temsili bir heyelanlı bölgede yerleştirilmiş kazıkların önden ve yandan görünümünü sunulmaktadır.



Şekil 4. Yamaçta pasif kazık uygulaması

## 2. HEYELANIN ÖZELLİKLERİ (PROPERTIES OF THE LANDSLIDE)

Sakarya ili, Karapürçek İlçesi, Kanlıçay Mevkii güney batı yamacında yol üzerinde gerçekleşmiş heyelan sonucunda meydana gelen çökmelerin

önüne geçilmesi için yapılan çalışmalar bu makalede örnek uygulama olarak anlatılacaktır. Öncelikle hareketin sebebinin belirlenmesi, sonrasında ise mevcut yolun ve arkasında kalan yapıların (Şekil 5) güvenliklerinin sağlanması için alınması gerekli önlemlerin belirlenmesine yönelik çalışmalar özetlenecektir.

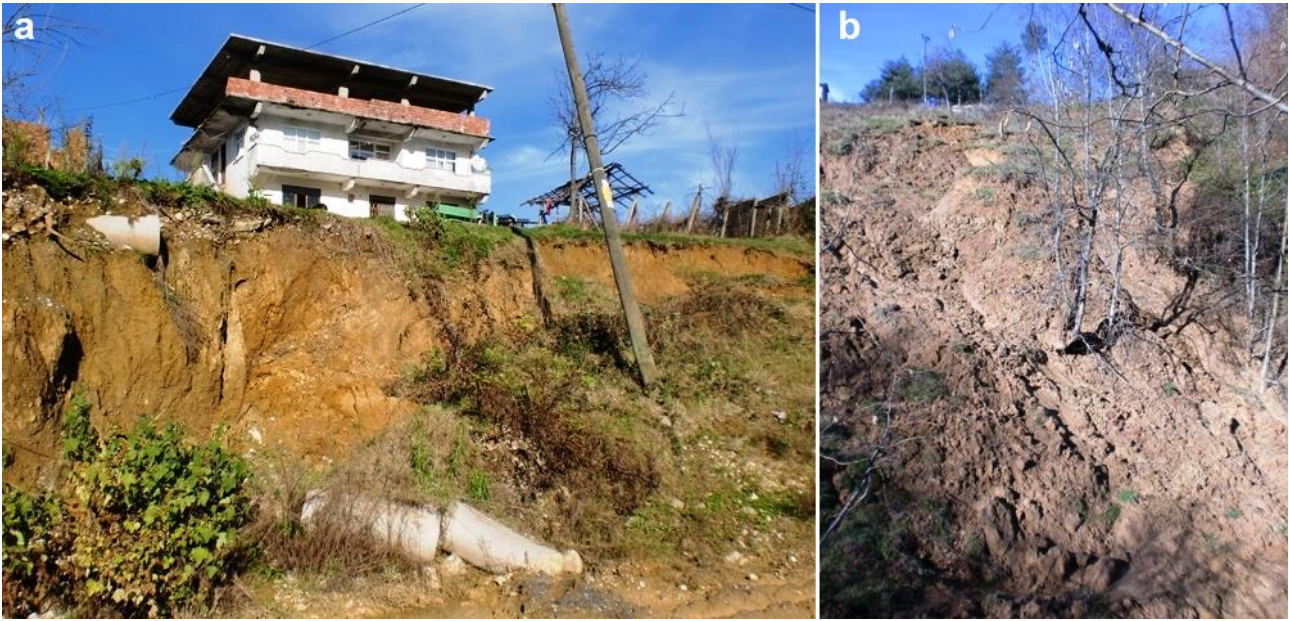


Şekil 5. Heyelan eden bölgenin yola ve arkasındaki yapılara göre konumu

Heyelan tacının koordinatları N40.63405 ve E030.49436 şeklindedir. Yaklaşık olarak 35-40 metre genişlik ve 60-65 metre uzunluğa sahip olan heyelan kitlesinde hareketin farklı zamanlarda gerçekleştiği, özellikle yağan yağmurlar sonucunda hareketin şiddetinin arttığı beyan edilmektedir. Heyelan tacı, arkasında bulunan üç katlı yapıya yaklaşık olarak 20 metre mesafededir (Şekil 6a).

Çalışma yapıldığı anda durmuş olan heyelanın geriye doğru ilerleyip bina için risk oluşturması mümkün gözükmemektedir. Alanda eğimler genelde Kuzey Batıdan Güney Doğuya doğrudur. Çalışma

alanında yola yakın üst kısımlarda eğim %25 civarında iken, dere yatağına doğru daha aşağı kısımlarda %47 civarında ölçülmüştür. Hareket sonucunda açığa çıkan heyelan aynası en yüksek yerinde yaklaşık 4-5 metre yüksekliğe sahiptir. Aynadan görüldüğü kadarıyla zemin kahverengi, düşük-orta plastisiteli killi-siltli birimlerden oluşmakta olup aynada sağlam kaya mostra vermemiştir (Şekil 6a). Heyelan kitlesi içerisinde ayrıca ufak çaplı tali aynalar da mevcuttur. Söz konusu alanda yapılan incelemelerde heyelan eden kitlenin özellikle eteklerine yakın yerlerinde suya doymun zeminlerin balçık kıvamına geldiği dikkati çekmiş ve fotoğraflanmıştır (Şekil 6b).



Şekil 6. a) Heyelan aynasının görünümü b) Eteğinde balçık kıvamına gelmiş heyelan kitlesi görünümü

Zeminin aşırı derecede suya doymun hale gelişinin nedeni; heyelanın bulunduğu alanın hemen solunda (batısında) kalıntı bir heyelan kitlesinin içinden geçen pınarın varlığıdır. Ayrıca heyelan kitlesinin tam tepesinde bulunan ve heyelan kitlesi ile birlikte hareket eden yolda temiz su boru hattının bulunduğu belirtilmiştir. Heyelanın söz konusu su hattına paralel şekilde oluşması; söz konusu boru hattı için kazılan hendeğin suyun birikmesine olanak sağlaması ve heyelanı hızlandırması görüşünü ortaya çıkarmıştır. Dolayısı ile zemin özellikleri bakımından zaten kritik durumda olan yamaçtaki heyelanı tetikleyen en büyük faktörler: a) Söz konusu boru hattının yataklanma gereği olan çakıllı taban malzemesi vasıtası ile yüzey sularını heyelan kitlesine yöneltmesi, b) Pınarla zeminin tabandan beslenmesi ve son olarak da c) Aşırı yağışlarla yamaçta su seviyesinin yükselmesidir. Farklı

sebepler ile artan su hacmi nedeniyle sistem tamamen doymun hale gelmiştir. Bu durum yamaç üzerindeki yükü aşırı oranlarda arttırmış, aynı zamanda da efektif gerilmeyi düşürmüştür. Sonuçta artan su miktarı; yamaçın dengesini olumsuz yönde etkileyecek olan sürücü kuvvetlerin artmasına neden olmuş, zeminin kayma direncini düşürmüş ve heyelan tetiklenmiştir. Tüm bunların yanında yol üzerinde gerçekleşen küçük oturmalardan meydana gelen kot farkını gidermek için yapılan yol dolguları heyelanın tepesinde ağırlığı artırıcı rol oynamıştır. Güvenlik sayısında sudan kaynaklanan devamlı düşüşün hızlanmasına ilaveten heyelan kitlesinin üzerinde yapılan söz konusu dolgu ilave olarak sürücü kuvvetleri arttırmış ve bu durum GS' nin ani düşüş göstermesine neden olmuştur.

### 3. YÖNTEM (METHOD)

Heyelan incelemelerinde araziye yapılan saha ziyaretleri büyük önem taşımakta ve bu noktada tecrübe problemin çözülmesinde büyük önem taşımaktadır. Zira problemin nedenini tam olarak ortaya koymadan akılcı bir çözüm sunmak mümkün görünmemektedir. Bu sebeple yapılan arazi incelemelerinde meydana gelmiş olan heyelan ve etrafındaki diğer jeolojik-jeomorfolojik oluşumlarla ilgili gözlemler yapılmıştır. Sahanın genel özellikleri ve heyelan eden kitle tüm doğrultulardan gözlemlenerek heyelanın özellikleri ortaya çıkarılmıştır. Bunun akabinde ayrıntılı arazi ve laboratuvar çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanında toplam uzunluğu 29.5 metre olan 3 adet dönel sondaj gerçekleştirilmiştir. Sondajlardan alınan numuneler üzerinde sınıflandırmaya yönelik fiziksel deneyler ve heyelan incelemesine yönelik mekanik laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Daha sonra kazıklı sistemlerin çözümünü yapabilen bir stabilite programı (Talren) ile analizler yapılmıştır [7]. Son olarak da sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis 2D yazılımı ile analizler yapılmış olup en uygun kazık

boyutlandırılması önerilmiş ve arazide uygulaması yapılmıştır.

#### 3.1. Deneysel çalışma (Experimental study)

Alanda yapılan sondaj çalışmalarından elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde TS1900-1 [8] ve TS1900-2 [9] uyarınca deneyler gerçekleştirilmiş ve TS1500 (2000)' e göre [10] de zeminlerin sınıfları belirlenmiştir. Yapılan sınıflandırmalara göre çalışma alanının üst kısımlarında daha çok yüksek plastisiteli yağlı killerin bulunduğu ve bunun altında ise killi az çakıllı kumların yataklandığı anlaşılmıştır (Tablo 1).

Kayma direnci parametrelerinin tayinine yönelik olarak 1.50-2.00 m ve 2.50-3.00 m örselenmemiş numuneleri üzerinde kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. Alanda mevcut hareketlenmeden dolayı zeminlerin dayanımının artık kalıntı (*residual*) dirençler ile temsil edilebileceği düşüncesi ile kesme kutusu deneyinde kalıntı parametreleri belirlemeye yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Kesme kutusu deney sonuçları Tablo 2' de özetlenmektedir. Buradan elde edilen veriler çalışma alanının stabilite problemlerinin çözümünde kullanılmıştır.

Tablo 1. Fiziksel deney sonuçları

Sondaj No	Derinlik	Renk	$w_n$	$w_L$	$w_P$	IP	$I_L$	%İnce	SPT <sub>N60</sub>	Sınıf [10]
SK-3	1.50-2.00	K	24	58	21	37	0.09	90	12	CH, Yağlı Kil
SK-3	2.50-3.00	K	27	39	19	20	0.41	75	---	CI, Orta Plastisiteli Kil ve Az Kum
SK-3	3.00-3.45	K	24	52	14	38	0.27	84	26	CH, Yağlı Kil ve Az Kum
SK-3	4.50-4.95	K	26	54	21	33	0.14	87	27	CH, Yağlı Kil
SK-3	6.00-6.45	K	26	50	22	28	0.12	75	34	CH, Yağlı Kil ve Az Kum
SK-3	7.50-7.95	K	22	57	20	38	0.06	74	38	CH, Yağlı Kil ve Az Kum
SK-3	9.00-9.45	K	22	53	19	34	0.08	68	37	CH, Kumlu Yağlı Kil
SK-3	12.00-12.45	KY	17	28	26	12	0.01	53	44	CL, Kum. D. Plst. Kil ve Az Çakıl
SK-3	15.00-15.45	aKY	20	32	21	11	-0.05	62	51	CL, Kumlu Düşük Plastisiteli Kil
SK-3	18.00-18.45	KY	18	32	17	15	0.04	45	52	SC, Killi Kum ve Az Çakıl
SK-3	19.50-19.95	KY	19	32	18	14	0.05	47	53	SC, Killi Kum ve Az Çakıl

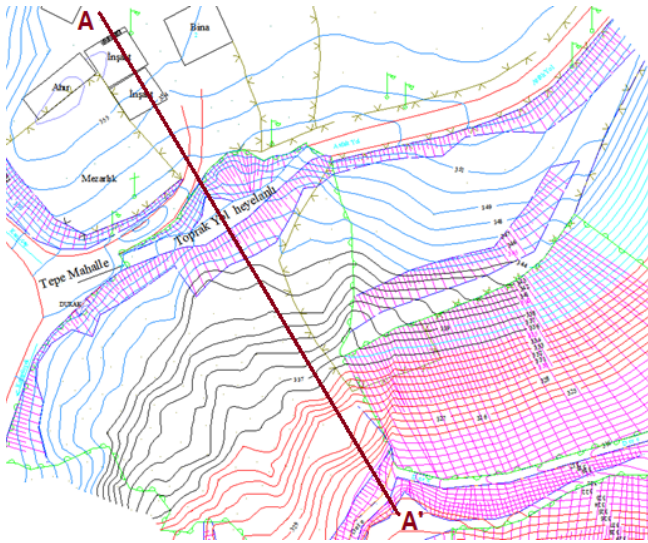
a: Açık, K: Kahve, Y: Yeşil

Tablo 2. Kesme kutusu deneyi sonuçları

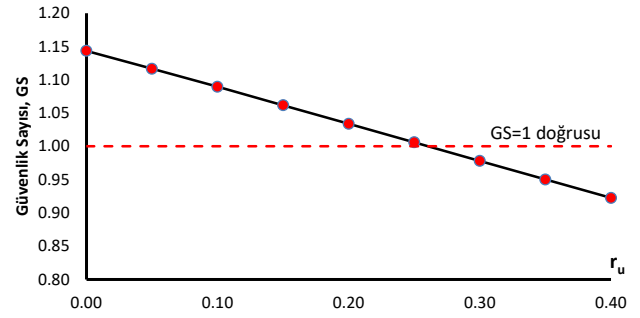
Sondaj No	Derinlik	Litoloji	$\rho$ (kN/m <sup>3</sup> )	$e$	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$c_r$ (kPa)	$\phi_r$ (°)
SK-3	1.50-2.00	CH	23.36	0.43	19	10	9	10
SK-3	2.50-3.00	CI	19.68	0.74	1	37	0	33

### 3.2. Analizler (Analyses)

Alanda meydana gelen heyelanın boşluk suyu basıncındaki ( $u_w$ ) artış nedeni ile tetiklendiği düşünülmektedir. Buna yönelik olarak, alanı temsil eden ve Şekil 7' de gösterilen en dik/kritik A-A' hattı boyunca boşluk suyu basıncının güvenlik sayısı üzerindeki etkisi deprensiz durumda incelenmiş ve sonuçlar Şekil 8' de gösterilmiştir. Sonuçta boşluk suyu basıncının şev üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve boşluk suyu basıncı oranı  $r_u$ ' nun 0.27 olması durumunda şevde güvenliğin kritik eşiğe geldiği görülmüştür.

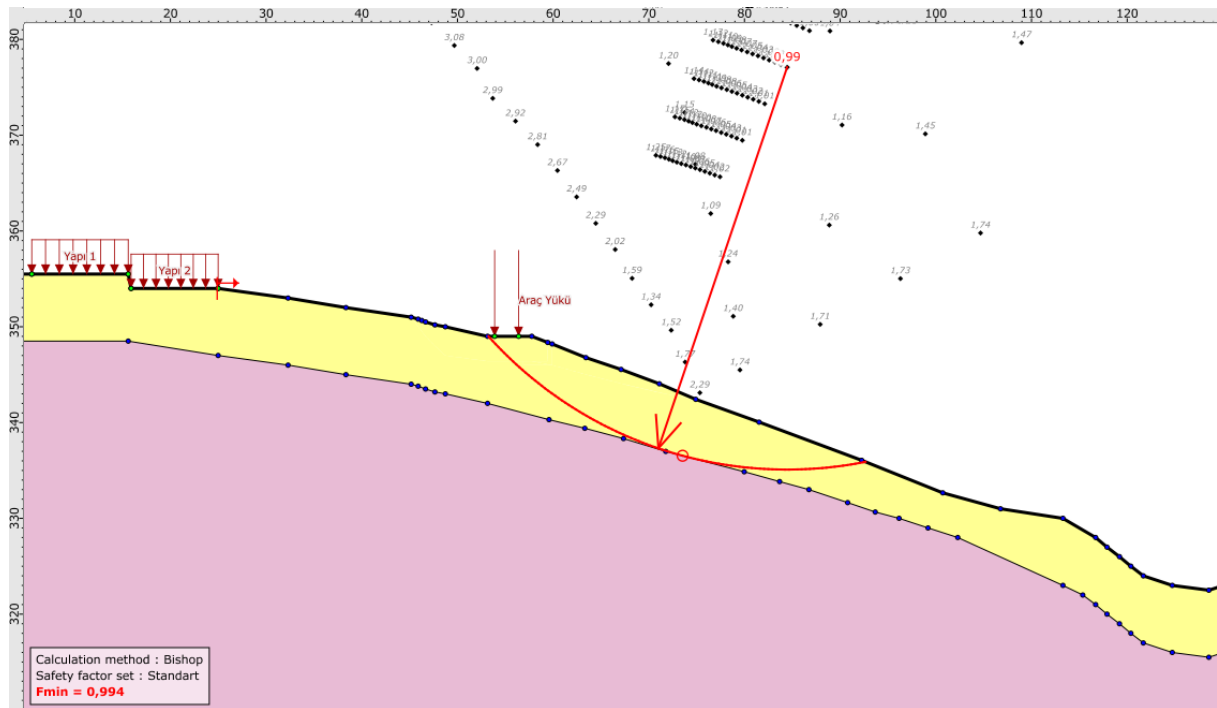


Şekil 7. Karapürçek heyelan analiz hattı (A-A')



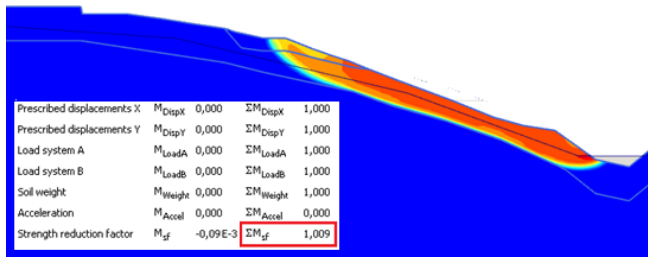
Şekil 8. A-A' kesitinde boşluk suyu basıncı oranı ( $r_u$ )-güvenlik sayısı (GS) ilişkisi

Tablo 2 incelendiğinde zeminin kalıntı kohezyonunun 0.00-9.00 kPa arasında ve kayma direnci açısının da  $10^{\circ}$ - $33^{\circ}$  arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerler göz önüne alınarak alanın mevcut topografyasının geri analizleri yapılmıştır. Geri analiz safhasında heyelanın meydana geldiği andaki yağışlı durum da göz önüne alınarak boşluk suyu basıncı oranı ( $r_u$ ) 0.27 olarak alınmıştır. Kayma meydana geldiği anda güvenlik sayısının  $\sim 0.99$  olduğu kabulü ile (Şekil 9) üstteki killi zeminin kohezyon değeri 19 kPa, sürtünme açısının  $10^{\circ}$  ve alttaki zeminin ise kohezyonunun 0 kPa, sürtünme açısının  $33^{\circ}$  alınmasına karar verilmiş ve analizlerde bu değerler kullanılmıştır. Geri analiz için kullanılan parametreler ışığında aynı çözümler Plaxis 2D [11] yazılımı kullanılarak yapılmış ve söz konusu çalışmada da beliren kayma yüzeyinin konumu gerçek durum ile örtüşmüştür (Şekil 10).



Şekil 9. Karapürçek/Kanlıçay heyelanı geri analiz sonucu





Şekil 10. Karapürçek/Kanlıçay heyelanı Plaxis 2D geri analiz sonucu

Heyelan analizlerinde yatay deprem (sismik) katsayısının ne seçileceği hakkında literatürde kesin bir yargı yoktur. Bununla birlikte Tablo 3' te bu konuda bazı araştırmacıların önermiş olduğu değerler özetlenmektedir. Çalışma alanı için yapılan heyelan analizlerinde yatay deprem ivmesi  $k_h=0.15g$  olarak alınmıştır.

Tablo 3. Melo ve Sharma (2004) tarafından derlenen yatay sismik katsayılar [12]

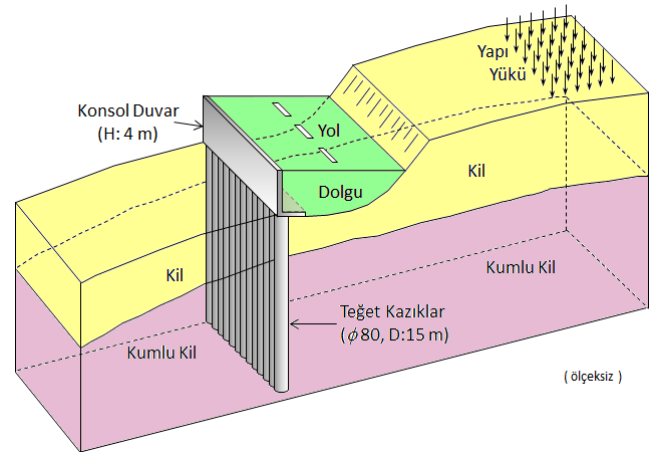
$k_h$	Açıklama	Referans
0.05-0.15	Amerika Birleşik Devletleri	
0.12-0.25	Japonya	
0.10	Ciddi ( <i>severe</i> ) Depremler	Terzaghi (1950) [13]
0.20	Şiddetli ( <i>violent</i> ) Depremler	Terzaghi (1950) [13]
0.30	Felaket Depremler ( <i>catastrophic</i> )	Terzaghi (1950) [13]
0.10-0.20	GS > 1.15	Seed (1979) [14]
0.10	Önemli ( <i>major</i> ) Depremler	Corps of Engineers (1982) [15]
0.15	Büyük ( <i>great</i> ) Depremler	Corps of Engineers (1982) [15]
PHA/3-PHA/2	GS > 1.0	Marcuson ve Franklin (1983) [16]
PHA/2	GS > 1.0	Hynes-Griffin ve Franklin (1984) [17]

GS=Güvenlik Sayısı, PHA= Maksimum Yatay İvme (Peak Horizontal Acceleration)

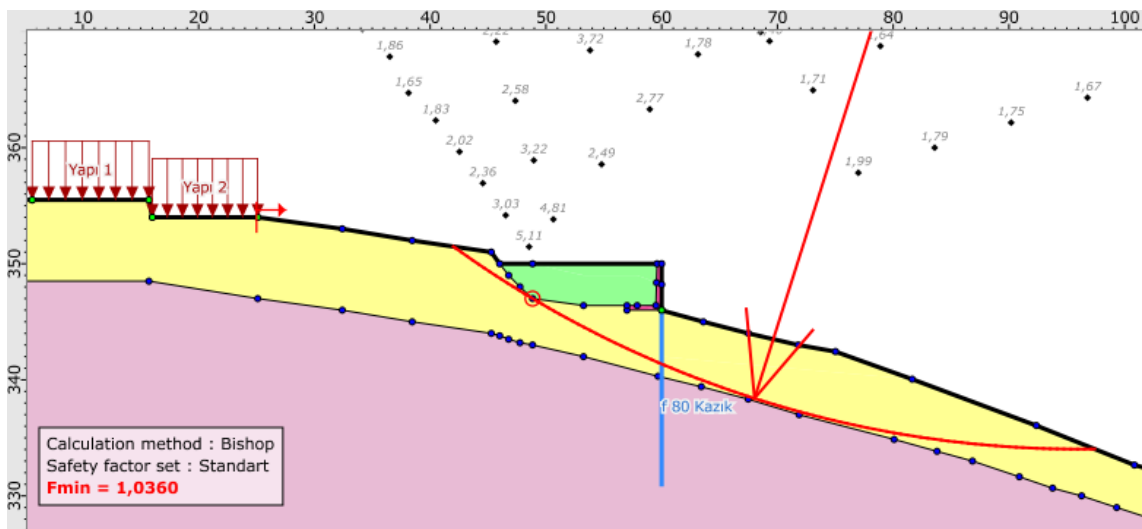
#### 4. İKSA SİSTEMİ TASARIMI (DESIGN OF THE RETAINING SYSTEM)

Yol üzerinde zaman zaman meydana gelen kaymalardan dolayı oluşan kot kaybı dolgu yapılarak giderilmeye çalışılmış, ancak bu da üst taraftaki yükü arttırdığından heyelanı önleyici bir

çözüm olmamış, aksine boyutunu büyütüştür. Bu bakımdan yolun kalıcı olarak güvenli bir şekilde tekrar kullanıma açılması için şevnin kazıklı bir sistemle takviye edilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu sebeple mevcut heyelandan dolayı meydana gelen yaklaşık 4 metrelik kot farkını gidermek için kazıkların üzerine oturtulmuş bir konsol duvar tasarlanmıştır (Şekil 11). Konsol duvarın kaymaya karşı güvenliğini arttırmak için de kazıkların üzerinden uzatılacak donatılarla bağlanması düşünülmüştür. Çapı 0.80 m, boyu 15 m olan teğet kazıkların üzerine yerleştirilmiş ve geri dolgu kaliteli gereçle yapılmış konsol duvar sistemi Talren v5 programı ile analiz edilmiştir. Bu sistemin depremsiz durumda güvenlik sayısının 1.47 olduğu görülmüştür. Aynı sistemin yatay sismik katsayı  $k_h=0.15$  alınarak çözülmüş durumu Şekil 12' de verilmektedir. Bu durumda güvenlik sayısının 1.04 olması da sistemin deprem anında dahi güvenliğini koruyacağına işaret etmiştir.



Şekil 11. Yolda meydana gelen kot kaybını önlemek için düşünülen konsol duvar sistemi



Şekil 12. Kazıklı sitemin depremleri için Talren V5 stabilite analizi sonucu

## 5. SAYISAL ÇÖZÜMLEMELER (NUMERICAL ANALYSIS)

Bu aşamada kazıklara gelen normal kuvvetler ve kesme gerilmeleri, momentler ve deformasyonları belirlemek amacı ile iki boyutlu sonlu elemanlar programı Plaxis 2D çözümler yapılmıştır [11]. Çözümler kazık önünün hem dolu hem de boş olması durumlarını temsil edecek şekilde uzun vade için gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte her iki çözüm aşamasında da zemin özellikleri iki farklı şekilde ele alınmış ve zeminler, pekleşen zemin modeli ile temsil edilmiştir. Her iki çözümü temsil eden zemin parametreleri Tablo 4' te, duvar ve kazık malzemelerine ait özellikler Tablo 5' te verilmektedir.

Tablo 4. Sayısal çözümlerlerde kullanılan zemin parametreleri

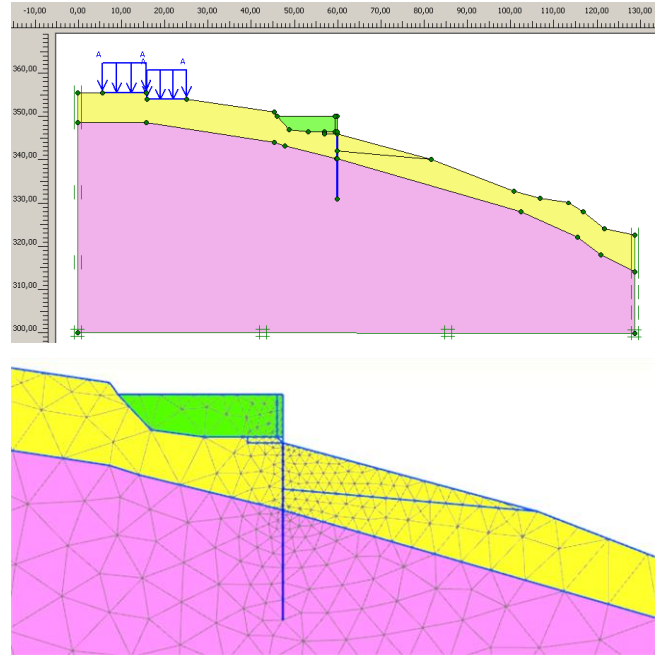
İsim	Çözüm 1			Çözüm 2		
	Üst Tabaka	Alt Tabaka	Dolgu	Üst Tabaka	Alt Tabaka	Dolgu
Malzeme Tipi	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı	Drenajlı
$\rho_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	21	22	21	21	22	21
$\rho_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	21	22	21	21	22	21
$E_{50}^{ref}$ (kPa)	10000	50000	50000	15000	100000	50000
$E_{oed}^{ref}$ (kPa)	10740	50000	50000	15000	100000	50000
$E_{ur}^{ref}$ (kPa)	30000	150000	150000	45000	200000	150000
Üstlük, m	0.8	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5
$c'$ (kPa)	19	0.1	25	25	10	5
$\phi'$ (°)	10	33	31	15	35	35
$\psi$ (°)	0	3	1	0	5	5
Pref	100	100	100	100	100	100
$K_{0,NC}$	0.826	0.455	0.485	0.741	0.426	0.426
$v'_{ur}$	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
OCR	2	5	3	2	5	3
$R_f$	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

Tablo 5. Sayısal çözümlerlerde kullanılan duvar ve kazık özellikleri

Malzeme	Duvar		Kazık	
	Linear Elastik (non-porous)		Linear Elastik (non-porous)	
E (kPa)	30000000		EA (kN/m)	24000000
$\rho_n$ (kN/m <sup>3</sup> )	24		EI (kNm <sup>2</sup> /m)	1280000
$\nu$	0.2		w (kN/m/m)	10
Kalınlık (m)	0.5		$\nu$	0.2
			Kalınlık (m)	0.80

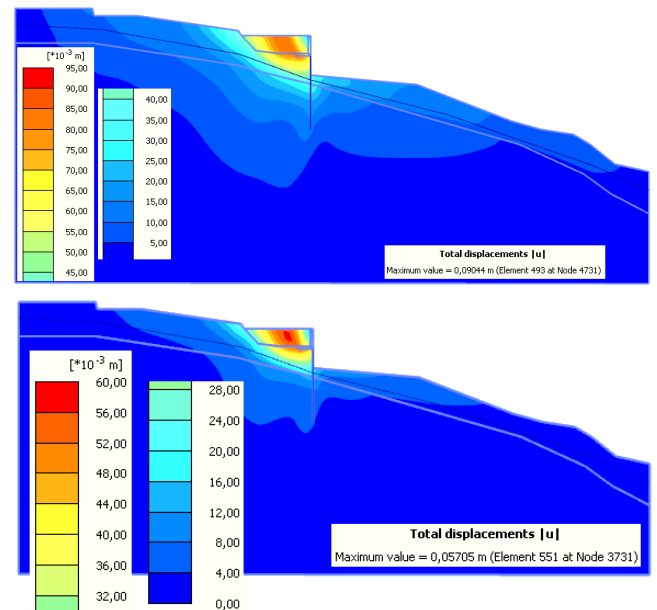
Şekil 13' te analizler için oluşturulan model ve sonlu eleman ağı kazık önünün dolu olması durumu için sunulmaktadır. Çözümde öncelikle doğal gerilmeler oluşturulduktan (initial phase) sonra zemine ortalama 40 kPa gerilme uygulayan bina aktif hale getirilmiş ve bu aşama (Phase 1) sonu doğal durum olarak kabul edilmiştir. Daha sonrasında sırasıyla kazık inşa edilmiş (Phase 2), duvar aktif hale getirilmiş (Phase 3), dolgu yapılmış (Phase 4) ve en son olarak da en kötü

durumu temsilen kazığın sağ tarafındaki zemin boşaltılmıştır (Phase 5).



Şekil 13. Plaxis 2D analizler için oluşturulan (a) model (b) sonlu eleman ağı

Şekil 14' te en kötü durumu temsilen kazık önünün boş olduğu durumda toplam deplasmanlar sunulmaktadır. Burada toplam deplasmanların zemin özelliklerinin görece kötü olduğu durumda ve kazık önünün boşaltılması sonrasında 90 mm civarında tahmin edildiği görülmektedir (Şekil 14a). Zemin özelliklerinin görece iyi olması durumunda toplam deplasmanlar 57 mm civarında tahmin edilmektedir (Şekil 14b).



Şekil 14. Phase 5 sonrası toplam deplasmanlar a) Çözüm 1 b) Çözüm 2

Kazık önünün hem dolu hem de boş olması durumlarını temsil eden 2 aşamalı çözüm sonuçları

Tablo 6’ da özetlenmektedir. Buradan uzun vadede kazık ve duvarda oluşacak yatay deplasmanların zemin özelliklerinin görece kötü olması durumunda kazık önü dolu iken 32.7 mm

ve kazık önü boşaltılmış iken 67.6 mm civarında kabul edilebilir değerlerde gerçekleşeceği ortaya çıkmaktadır.

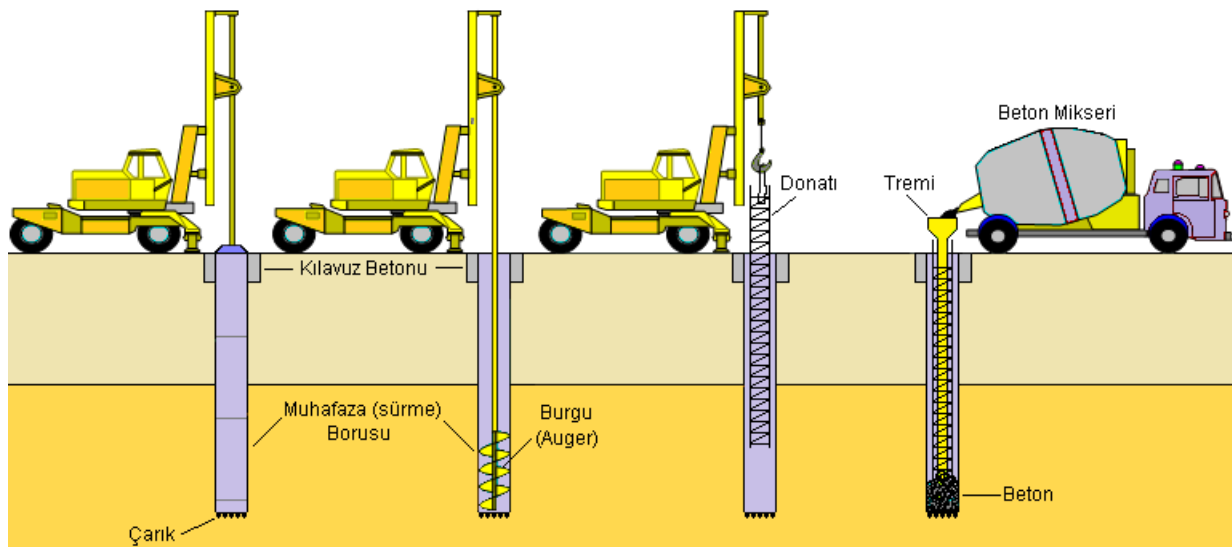
Tablo 6. Plaxis 2D analiz sonuçları

	$N$ (kN/m)		$T$ (kN/m)		$M$ (kNm/m)		$U_{x,max}$ (mm)	
	Çözüm 1	Çözüm 2	Çözüm 1	Çözüm 2	Çözüm 1	Çözüm 2	Çözüm 1	Çözüm 2
4. Aşama (kazık önü dolu)	-331.9	-315.1	+104.5 -109.1	+124.6 -110.2	548.6	617.0	32.72	23.66
5. Aşama (kazık önü boş)	-381.7	-362.6	+192.5 -206.8	+175.1 -211.8	960.1	910.1	67.64	40.32

## 6. KAZIKLI SİSTEM UYGULAMASI (APPLICATION OF PILED SYSTEM)

Analizlerin tamamlanmasından sonra arazide uygulamaya başlanmıştır. Şekil 15’ de fore kazık imal aşamaları gösterilmektedir. Uygulamada ilk önce tesviye edilen yapım alanı üzerine kılavuz betonu dökülür. Bu beton delme sırasında çarık ve muhafaza borularının düzgün bir istikamette gitmesini sağlar. Delme işlemi çarık denilen ucu sertleştirilmiş silindirik boru uzantısı ile yapılır. Çarık aşağı doğru hidrolik itki ve dönme işlemi ile ilerlerken hemen peşine uygun çaplardaki muhafaza boruları sürülür ve bu işlem arzu edilen derinliğe kadar muhafaza borularının arka arkaya eklenmesi ile yürütülür. Aynı zamanda muhafaza borusunun içinde bulunan zemin auger vasıtası ile yukarıdan aşağıya doğru temizlenir. İçi boş muhafaza borusunun içine donatı yerleştirilir. Donatıların ortasındaki boşluktan kuyu tabanına kadar uzanan bir tremi (huni) yerleştirilir.

Treminin görevi mikser tarafından getirilen betonun kuyu tabanına düzgün bir şekilde ulaşmasını sağlamaktır, zira özellikle su seviyesinin yüksek olduğu bölgelerde kazık içine serbestçe bırakılan betonun suya çarpmasıyla agrega ile çimento birbirinden ayrılarak segregasyon meydana gelebilir. Beton tabandan yukarıya doğru tremi vasıtası ile kuyu içine doldurulurken kuyu içindeki çamur-su karışımı kuyu ağzından yukarıya doğru çıkmaktadır. Kuyu tamamen betonla doldurulduktan sonra muhafaza boruları diğer kazıkta kullanılmak üzere yukarı çekilir. Bu adımlarla Karapürçek arazisinde imal edilen 80 cm çaplı, 15 metre uzunluğundaki teğet kazıkların arazide imalatı Şekil 16’ dan izlenebilir. Burada güçlendirmesi yapılacak yolun hemen altında fore kazık makinasının delgi işlemi görülmektedir. Aynı zamanda kuyu içine yerleştirilecek donatılar da yine Şekil 16’ dan izlenebilir. Şekil 17’ de ise imalatı tamamlanmış pasif kazıklar üzerine oturtulmuş konsol duvar görülmektedir.



Şekil 15. Fore kazık imal aşamaları



Şekil 16. Kazık delgi işlemi ve donatıların hazırlanması



Şekil 14. İmalat sonu konsol duvarın karşı yamaçtan görünümü

Bu sistem ile yol eski kotuna getirilmiş ve kullanıma açılmıştır. İmalattan sonra geçen iki senelik zaman diliminde yapılan gözlemlerde yol kotunda ve kazıklı iksa sisteminde herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Türkiye’de yaklaşık 120 cm çapına kadar sorunsuz imal edilebilen fore kazıklar çok derin olmayan kayma yüzeyleri için stabiliteyi güvenle sağlayan yapı elemanları olarak kullanılabilir.

## 7. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu makalede kazıklı iksa sisteminin, stabilitesi her aşırı yağış sonrasında bozulan ve üzerinde devamlı kullanılan bir yol ile evler bulunan bir yamacın güvenliğinin sağlanması için kullanımı açıklanmıştır. Sondajlardan gelen numuneler üzerinde laboratuvarda yapılan fiziksel deneylerin sonuçlarına göre; üst 7.50 metrelerde aşağıdaki kayaların ayrışma ürünü olan yüksek plastisiteli



killerin hâkim olduğu belirlenmiştir. Yamacın yüzeysel ve yeraltı suları ile yıllardır beslenmesi kayma direncinin dereceli olarak düşmesine sebep olmuştur. Zeminin heyelana etmesi ile düşen yol kotunun yükseltilmesi amacıyla dolgu yapılmasının doğru bir yaklaşım olmadığı ortaya konmuştur. Limit denge yöntemlerini ve sonlu eleman yaklaşımını kullanan farklı yazılımlarla yapılan analizler sonrasında Yamacın güvenliğinin sağlanması ve yol kotunun eski haline getirilebilmesi için; çapı 0.80 m, boyu 15 m olan teğet kazıkların üzerine yerleştirilmiş ve geri dolgusu kaliteli gereçle yapılmış konsol duvar sisteminin oluşturulması gerekli görülmüştür. İmalattan sonra yol eski kotuna yükseltilebilmiştir. Çözüm öncesi hemen her yıl ilave edilen dolgu ile yükseltilmeye çalışılan yol, kazıklı iksa sisteminin imalatından sonra yağışlı mevsim geçirmesine rağmen sorunsuz bir şekilde hizmet vermeye devam etmektedir.

Not: Bu makale, ISITES2016 (4th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science) Sempozyumunda yayınlanan bildirinin genişletilmiş halidir.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] O. Gökçe, Ş. Özden ve A. Demir, «Türkiye’de afetlerin mekansal ve istatistiksel dağılımı.» Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 2008.
- [2] T. Ito ve T. Matsui, «Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles,» *Soils and Foundations*, cilt 15, no. 4, pp. 43-60, 1975.

- [3] H. Sommer, «Creeping slope in a stiff clay,» %1 içinde *Proceedings of 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, A. A. Balkema, 1977, pp. 113-118.
- [4] M. F. Nethero, «Slide control by drilled pier walls,» %1 içinde *Proceedings of the Application on Walls to Landslide Control Problems*, Las Vegas, Nevada, ASCE Convention, 1982, pp. 61-76.
- [5] R. Kourkoulis, F. Gelagoti, I. Anastasopoulos ve G. Gazetas, «Hybrid Method for Analysis and Design of Slope Stabilizing Piles,» *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, cilt 138, no. 1, 2012.
- [6] A. Önalp ve E. Arel, *Yamaç ve Şevlerin Duraylılığı*, İstanbul: Birsen Yayınevi, 2007.
- [7] Talren, «Advanced Program for Slope Stability,» Terrasol, Paris, 2015.
- [8] TS 1900-1, *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri Tayini, Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini*, Ankara: Türk Standardları Enstitüsü, 2006.
- [9] TS 1900-2, *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri, Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini*, Ankara: Türk Standardları Enstitüsü, 2006.
- [10] TS 1500, *İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması*, Ankara: Türk Standardları Enstitüsü, 2000.
- [11] R. B. J. Brinkgreve, E. Engin ve W. M. Swolfs, *PLAXIS 2D AE Manual*, A.A. Balkema, 2014.
- [12] C. Melo ve S. Sharma, «Seismic coefficients for pseudostatic slope analysis,» %1 içinde *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., 2004.
- [13] K. Terzaghi, *Mechanisms of Landslides*, cilt Engineering Geology (Berkeley) Volume, Geological Society of America, 1950.
- [14] H. B. Seed, «Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams,» *Géotechnique*, cilt 29, no. 3, pp. 215-263, 1979.
- [15] Corps of Engineers, *Slope Stability Manual EM-1110-2-1902*, Washington, D.C.: Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, 1982.
- [16] M. F. Marcuson ve A. G. Franklin, «Seismic Design, Analysis, and Remedial Measures to Improve the Stability of Existing Earth Dams - Corps of Engineers Approach,» %1 içinde *Seismic Design of Embankments and Caverns*, New York, ASCE, 1983.
- [17] M. E. Hynes-Griffin ve A. G. Franklin, *Rationalizing the seismic coefficient method*, Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, Miscellaneous Paper GL-84-13, 1984.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 28.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 25.04.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.295296	

## Tek silindirli bir dizel motorda atık biyodizel kullanımının motor performansı ve emisyonlarına etkisi

Mustafa Aydın <sup>\*1</sup>, Mehmet Afşar<sup>2</sup>, M. Bahattin Çelik<sup>3</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada atık yağlardan elde edilen biyodizelin bir dizel motorda alternatif yakıt olarak kullanılmasının motor performansı ve emisyonlarına etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Deneylerde dört zamanlı, tek silindirli, direkt püskürtmeli bir motor kullanılmıştır. Test motoru, dizel ve saf biyodizel yakıtları ile sabit bir hızda ve farklı yüklerde test edilmiştir. Test sonuçlarına göre, biyodizel kullanımı ile dizel yakıtına göre fren özgül yakıt tüketiminde %3 artış, fren özgül enerji tüketiminde %5 azalma elde edilmiştir. Ayrıca, NO<sub>x</sub>, CO ve is emisyonlarında dizel yakıtına göre sırasıyla %17, %33 ve %31 oranlarında azalma, HC emisyonunda ise %24 oranında artış tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyodizel, dizel motor, performans, emisyon, yakıt tüketimi

## The effects of waste biodiesel usage on engine performance and emissions at a single cylinder diesel engine

### ABSTRACT

In this study, effect of biodiesel, as an alternative fuel, which was produced from waste oil on motor performance and emissions was investigated experimentally. In the experiments, diesel engine which had four strokes, single cylinder and direct injection was used. Diesel and pure biodiesel were used in engine as a fuel. Besides, the test engine was tested at constant speed under various loads. According to experimental results, when the biodiesel was used as a fuel, brake specific fuel consumption was increased about 3% and break specific energy consumption was decreased about 5% as well. Besides, NO<sub>x</sub>, CO, and smut emissions were decreased about 17%, 33%, and 31%, respectively. Moreover, HC emission was increased about 24%.

**Keywords:** Biodiesel, diesel engine, engine performance, emission, fuel consumption

<sup>1</sup> m.aydin@karabuk.edu.tr Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü Karabük TÜRKİYE

<sup>2</sup> mehmetafsar06@gmail.com Ankara TÜRKİYE

<sup>3</sup> mbcelik@karabuk.edu.tr Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Karabük TÜRKİYE

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İçten yanmalı motorlarda yakıt olarak kullanılan petrolün rezerv ömrünün azalması ve gün geçtikçe sıkılaşılan emisyon standartları nedeniyle petrol türevi yakıtlara alternatif olabilecek çevre dostu yakıtların bulunması günümüz otomotiv endüstrisinin en önemli problemleri arasındadır. Bitkisel ürünlerden ve atık yağlardan elde edilebilen biyodizel, dizel motorlarda kullanıldığında egzoz emisyonlarında azalma elde edilebilmektedir. Atık yağlardan biyodizel üretimi, maliyetinin düşük olmasının yanında atık yağların çevreye verdiği olumsuz etkilerin ortadan kalkmasına da büyük fayda sağlamaktadır. Aksi halde atık yağlar çevreye bilinçsiz bir şekilde atılmaktadır bu da büyük bir çevre felaketine yol açmaktadır [1]. Biyodizel fosil yakıtlara oranla daha düşük emisyon değerlerine sahiptir. Başlıca zararlı emisyonlar olarak; CO, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, HC ve is emisyonları sayılabilir. Biyodizel yakıtı kullanımı ile bu zararlı emisyonlar düşürülebilmektedir. Bu düşüşün en önemli etkenlerinden birisi biyodizelin kimyasal yapısında bulunun oksijendir. Biyodizel içeriğinde bulunan oksijen yanma esnasında tepkimeye giren homojen oksijen miktarını artırdığından yanmanın kalitesini artırmaktadır [2]. Atık biyodizel, dizel motorların sistemlerinde herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duyulmadan kullanılabilen bir alternatif yakıt türüdür. Aşağıda verilen literatür özetinde biyodizelin dizel yakıtı ile birlikte farklı oranlarda karıştırılarak kullanılması sonucu motor performans ve emisyonlarına etkisini inceleyen çalışmalar özetlenmiştir.

Çetinkaya ve Karaosmanoğlu tarafından yapılan çalışmada, atık kızartma yağlarından elde edilen biyodizelin jeneratör motorunda, farklı motor yüklerinde performans ve gürültü emisyonları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, kullanılmış yemeklik yağ kökenli biyodizelin, sulama amaçlı tarımsal alanlarda ve sabit tesislerde kullanıma uygun alternatif çevre dostu jeneratör yakıtı olduğunu ayrıca gürültü emisyonlarının ise dizelden daha düşük olduğu ifade edilmiştir [3].

Behçet ve Çakmak tarafından yapılan çalışmada dizel bir motorda balık yağından elde edilen biyodizel karışımlarının motor performans ve emisyonlarına etkisi incelenmiştir. Biyodizel miktarı arttıkça dizel yakıtına göre motor momenti, motor gücü, SO<sub>2</sub> ve CO emisyonunda

azalma meydana gelirken özgül yakıt tüketimi, egzoz gazı sıcaklığı ve NO<sub>x</sub> emisyonunda artış meydana geldiği gözlemlenmiştir. Balık yağından elde edilen biyodizelin dizel yakıtına benzer özellikler gösterdiği ve bu sebeple egzoz emisyonlarını azaltıcı yönde etkilerinden dolayı dizel yakıtına alternatif bir yakıt olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir [4].

Sugözü vd. yaptıkları çalışmada, atık motor yağlarını toz, metal parçacıkları, kükürt ve su gibi maddelerden arıtarak, dizel motorlarında kullanılabilir yakıt elde etmişler ve bu yakıtın motor performansı ve egzoz emisyonu üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. %5, %10, %15 atık motor yağı ve motorini, dizel bir motorda kullanarak, motor performans ve egzoz emisyonları bakımından karşılaştırmışlardır. Test sonuçlarına göre, atık motor yağından yaklaşık % 10 oranında dizel motorlarda kullanılabilir dizel benzeri yakıt elde etmişlerdir. Testler 1200-2400 dev/dk ve tam yük pozisyonunda dizel yakıtına %5, %10, %15 oranlarda atık motor yağı katılarak yapılmıştır. Yapılan testlerin sonucunda motor performansının düştüğü, tork ve efektif gücün dizel yakıtına göre daha düşük, özgül yakıt tüketiminin ise daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca elde edilen karışım yakıtlarının CO ve NO<sub>x</sub> emisyon değerlerinin dizel yakıtına göre daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir [5].

Behçet vd. yaptıkları çalışmada, atık kızartma yağı metil esterinin dizel motorunda, motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisini araştırmışlardır. Çalışmalar değişik karışım oranlarında ve motor hızlarında yapılmıştır. Yapılan çalışmaların sonucunda elde edilen motor momenti ve efektif motor gücü dizel yakıtından biraz düşük, yakıt tüketimi ise fazla çıkmıştır. Aynı devirlerde elde edilen değerler birbirine yakın çıkmıştır. Emisyon deneylerinde ise, NO<sub>x</sub> ve O<sub>2</sub>, metil ester karışımlarında dizel yakıtından daha yüksek çıkmıştır. HC, CO<sub>2</sub> ve CO emisyonları metil ester karışımlarında daha düşük seviyelerinde kalmıştır. Motor emisyonlarında metil ester karışımları genel olarak çevreye daha az zararlı olduğu belirlenmiştir [6].

Sekmen yaptığı çalışmada karpuz çekirdeği ve keten tohumu yağı metil esterlerinin bir dizel motorda yakıt olarak kullanılabilirliği araştırmıştır. Testler değişik motor devirlerinde ve değişik karışım oranlarında gerçekleştirilmiştir. Karpuz çekirdeği ve keten tohumu yağı metil esterlerinin ısıl değerinin düşük olmasından dolayı

moment ve efektif güçte azalma, özgül yakıt tüketiminde artma gözlemlenmiştir. Karpuz çekirdeği ve keten tohumu yağı metil esterlerinin karışımları motorda kullanıldığında, egzoz gaz sıcaklıkları dizel yakıtı göre biraz daha yüksek olarak ölçülmüştür. CO ve HC emisyonları ile duman koyuluğunda azalma elde edilirken, silindir sıcaklıklarının artması ve biyodizelin oksijen içeriği nedeniyle NOx emisyonlarında artış gözlemlenmiştir [7].

Sekmen ve Aktaş yaptıkları çalışmada, soya yağı metil esterinin dizel bir motor da kullanımının performans ve emisyonlara etkisi incelemiştir. Testler tam yükte ve değişik devirlerde yapılmıştır. Testlerin sonucunda biyodizelin ısıl değerinin düşük olmasından dolayı efektif güçte azalma, özgül yakıt tüketiminde artış belirlenmiştir. Biyodizel ile çalışmada egzoz gaz sıcaklığı dizel yakıtı oranla daha düşük olarak ölçüldüğünü ifade etmişlerdir. Ayrıca CO, HC ve NOx emisyonları ile duman koyuluğunda azalma gözlemlenmiştir [8].

Oğuz tarafından yapılan çalışmada dizel yakıtı ayçiçeği yağı karışımlarının belirli oranlarda hacimsel olarak karıştırılarak, dizel motorlarında yakıt olarak kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. Ayçiçeği yağı dizel yakıtına hacimsel olarak % 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 oranlarında karıştırılmış ve elde edilen bu yakıtlar 4 zamanlı, 3 silindirli, 43 kW gücünde John Deere 3179 DF dizel bir motorunda denenmiştir. Testlerde yakıt tüketimi, moment, güç, duman koyuluğu ve HC, CO, CO<sub>2</sub> olarak gaz emisyonları incelenmiştir. Testlerin sonucunda rafine edilmiş ayçiçeği yağı ile dizel yakıtı karışımları dizel yakıtı ile karşılaştırıldığında, motor performansında önemli oranlarda değişme olmadığı belirlenmiştir [9].

Ceviz vd. yaptıkları çalışmada beş farklı bitkisel yağdan üretilen biyodizeller ile dizel yakıtını motor performansı ve emisyon karakteristikleri bakımından karşılaştırmalı olarak incelemiştir. Çalışmalarında, fındık-ayçiçek yağı karışımı metil esterleri, soya yağı metilesteri, ayçiçek kızartma metilesteri, mısır kızartma metilesteri, fındık yağı metilesterleri ile dizel yakıtı bir dizel motorda 1000, 1250, 1500, 1750, 2000 ve 2250 dev/dk motor devrinde çalıştırmışlardır. Test sonuçlarına göre biyodizel yakıtlarının, dizel yakıtına göre motor gücünde belli oranlarda düşmeye sebep olduğu, bu durumun ise biyodizel yakıtın dizel yakıtına göre daha düşük ısıl değere sahip olmasından kaynaklandığı belirtmişlerdir.

Biyodizel yakıtları ile çalışmada, dizel yakıtı göre özgül yakıt tüketiminin, HC ve CO<sub>2</sub> emisyonunun azaldığını, CO emisyonunda çok az bir miktarda artış olduğunu, beş farklı metil esterleri arasında ise; en yüksek performans ve en düşük emisyon seviyesinin fındık yağı metil esteri ile elde edildiğini belirtmişlerdir [10].

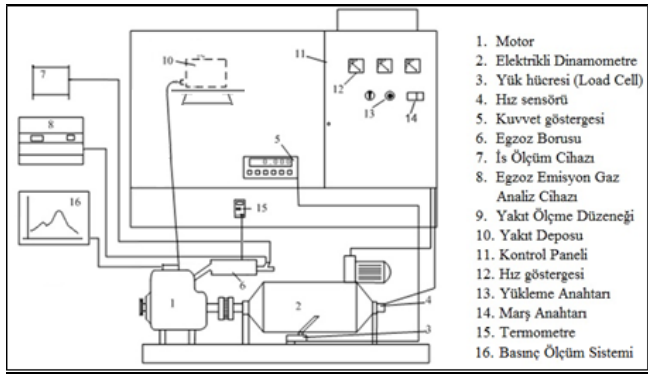
Ulusoy vd. yaptıkları çalışmada; atık yemeklik yağlardan biyodizel üretmişlerdir. Ürettikleri biyodizeli TOFAŞ otomotiv fabrikasında dizel bir motorlu taşıtta şasi dinamometresi kullanarak test etmişlerdir. Testlerin sonucunda, biyodizel kullanımının 2 numaralı dizel yakıtına göre tekerlek gücünde %2,03'lük, tekerlek momentinde %3,35'lik, ivmelenme test sonuçlarında, 40 km/sa'ten 100 km/sa'e hızlanmada %7,32'lik, 60 km/sa'ten 100 km/sa'e hızlanmada %8,59'luk bir azalma meydana getirdiğini, emisyon testlerinde ise biyodizel kullanımı ile CO, yanmamış HC, PM emisyonunda 2 numaralı dizel yakıtına göre sırasıyla %8,59, %30,66, %63,33 azalma olurken CO<sub>2</sub> emisyonunun %2,62, NOx emisyonunun %5,03 arttığını gözlemlenmiştir. Yapılan testlerde biyodizel yakıtı, 2 numaralı dizel yakıtına göre %2,43 daha az yakıt tüketimi sağlamıştır [11].

Bu çalışmada atık yağdan elde edilen biyodizelin, tek silindirli dört zamanlı direkt püskürtmeli bir dizel motorda, motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Deneyler Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı'na ait motor test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. DC dinamometre, dizel motor, yakıt tüketimi ölçüm ünitesi, hava tüketimi ölçüm ünitesi, egzoz gaz ölçüm ve is (opasite) ünitesi, silindir basıncı ve yakıt hat basıncı ölçüm ünitesinden oluşan test düzeneğinin şematik görünümü Şekil 1'de verilmiştir.





Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü (Schematic view of the test setup).

Deneyler, KEMSAN marka bir motor test dinamometresinde yapılmıştır. Motor test dinamometresi, test motoruna ilk hareket vermek için, test motorunu boşa çevirebilmek ve yüklemek için kullanılabilir. Motor test dinamometresinin maksimum hızı 4000 d/d olup 10 kW'a kadar güç yutabilmektedir. Motor devrinin ölçümünde dinamometre üzerindeki takojenaratör kullanılmıştır. Deney sırasında, motor yükte çalışırken baskı kuvveti değeri dinamometreye 0,25 m uzaklıktaki yük hücresinden okunmuştur. Yük hücresinden okunan baskı kuvveti değeri motor momentinin hesaplanmasında kullanılmıştır. Yakıt tüketimi, herhangi bir zaman diliminde yakıt deposundaki yakıtın ağırlığının değişimi hassas terazi ile ve bir kronometre yardımı ile ölçülmüştür. Kütleli yakıt tüketimini ölçmek için Dikomsan marka 0,1 g hassasiyetli elektronik bir terazi kullanılmıştır. Yakıt tüketim süresinin ölçülmesinde Charles Sernard marka bir kronometre kullanılmıştır. Kronometre 1 salise hassasiyetinde dijital ölçüm yapabilmektedir. Egzoz gaz sıcaklığının ölçümünde K tipi termokupl kullanılmıştır. Emisyonlar (HC ve NO<sub>x</sub> (ppm), CO (%)) ITALO Plus Spin egzoz emisyon ölçme cihazı ile ve is (opasite) MRU Optrans 1600 ile ölçülmüştür. Egzoz gaz analiz cihazının ve opasimetrenin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Egzoz gaz analizörü ve opasimetre özellikleri (Exhaust gas analyzer and opacimeter technical specifications).

		Ölçüm Aralığı	Doğruluk
Egzoz Gaz Analizörü	CO (% v/v)	0-15	0,01
	HC (ppm)	0-20000	1
	NO <sub>x</sub> (ppm)	0-4000	1
Opasimetre	İs (Opasite) (%)	0-100	± 2

Deney motoru olarak tek silindirli hava ile soğutmalı bir dizel motor kullanılmıştır. Motor testlerinde kullanılan dizel motora ait teknik özellikler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Dizel motor özellikleri (Diesel engine specifications).

Model	Katana KM 178 F
Genel	Tek Silindirli, direkt püskürtmeli, hava ile soğutmalı, doğal emişli, ve dört zamanlı
Güç (kW, 3000 d/d-3600 d/d)	4-4,4
Çap (mm) x Kurs (mm)	78x62
Silindir Hacmi (cm <sup>3</sup> )	296
Sıkıştırma Oranı	18/1
Yakıt Pompası Avansı (KMA)	31°
Enjektör Açılma Basıncı (bar)	205 ±5

Deneylerde yakıt olarak atık yağlardan elde edilen biyodizel yakıtı kullanılmıştır. Atık yağlardan elde edilen biyodizel yakıtı Kocaeli Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yakıt Araştırma Laboratuvarında üretilmiş ve analiz edilmiştir. Deneylerde kullanılan yakıtların özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Deney yakıtlarının özellikleri (Test fuels specifications).

Yakıtın Adı	Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	Kinematik Viskozite (mm <sup>2</sup> /s)	Isıl Değer (kJ/kg)	Parlama Noktası (°C)	Setan Sayısı
Biyodizel	889	5,0	39576	163	60,4
Dizel	828	2,6	42640	60	56,5

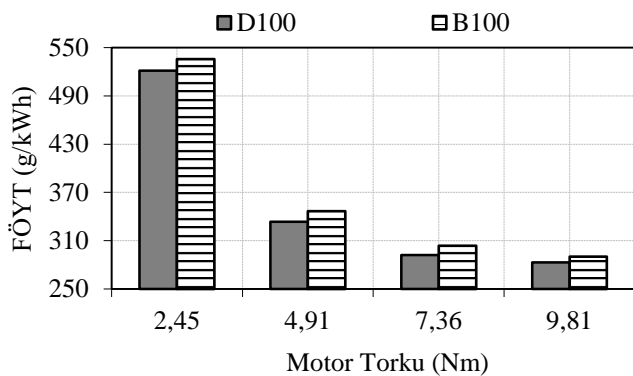
Deneylere başlamadan önce motorun ayarları kontrol edilmiş ve motor çalışma sıcaklığına getirildikten sonra deneylere başlanmıştır. Deneysel çalışma sırasında motor; dizel yakıtı D100 (%100) ve biyodizel yakıtı B100 (%100) ile farklı yüklerde ve sabit bir hızda (2600 d/d) test edilmiştir. Testler 4 değişik yükte yapılmıştır. Bunlar 2,45 Nm, 4,91 Nm, 7,36 Nm ve 9,81 Nm'dir. Deneylerde, her bir adımda motor devri ve momenti sabitleştikten, kuvvet ve termometre göstergeleri kararlı hale geldikten sonra yanma ile ilgili veriler kaydedilmiştir.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Deneysel sonuçlar motor performansı ve egzoz emisyonları olmak üzere iki alt başlıkta incelenmiştir.

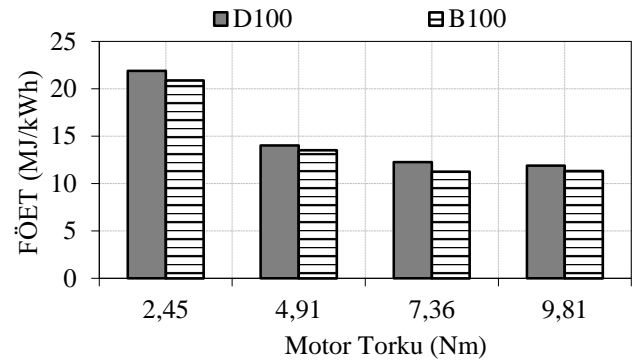
### 3.1. Motor Performansı (Engine Performance)

Motor yükü ve test yakıtların (Fren Özgül Yakıt Tüketimi) FÖYT'ye etkisi Şekil 2'de verilmiştir. Tüm motor yüklerinde B100 yakıtı kullanımında D100 yakıtına oranla FÖYT'de yaklaşık ortalama %3'lük bir artış gözlenmiştir. Bunun nedeni biyodizelin alt ısı değerinin dizel yakıtına göre düşük olmasıdır. Motor yükü arttıkça FÖYT'de iyileşme gözlenmiştir. B100 ve D100 yakıtları arasındaki yaklaşık %3'lük fark 4,91 Nm ve 7,36 Nm motor yüklerinde %4'e yükselmiştir. Yük arttıkça FÖYT'nin düşmesinin nedeni yanma veriminin artması ve ısı kayıpların azalmasıdır.



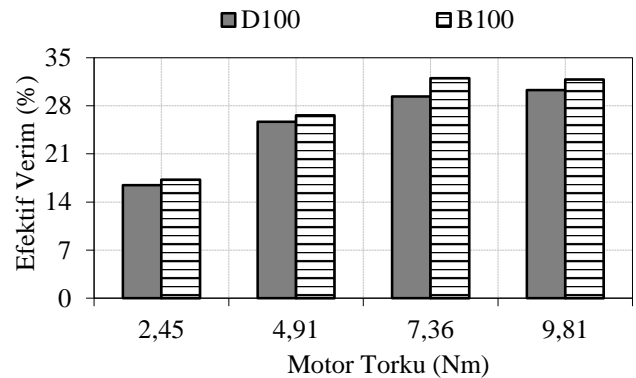
Şekil 2. Motor yükünün ve test yakıtlarının FÖYT'ye etkisi (The effects of Engine load and test fuels on FÖYT).

Motor yükünün ve test yakıtlarının (Fren Özgül Enerji Tüketimi) FÖET'e etkisi Şekil 3'te verilmiştir. Özellikle farklı yoğunluk ve ısı değerindeki yakıtların karşılaştırılmasında FÖET uygun bir parametredir. FÖET, belirli bir çıkış gücü için verilmesi gereken enerjiyi ifade eder ve FÖYT ve yakıtın ısı değeri kullanılarak hesaplanır. 2,45 Nm de, B100 yakıtı kullanımında D100 yakıtına oranla FÖET'de yaklaşık %4,2 lik bir düşme, 4,91 Nm de %3,43'lük bir düşme, 7,36 Nm de %8,32 bir düşme ve 9,81 Nm de %4,8 lik bir düşme gözlenmiştir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, test yakıtlarından B100 yakıtı bütün motor yüklerinde D100 yakıtına oranla daha düşük FÖET göstermiştir. Biyodizelin yapısında oksijen bulunması yanmayı iyileştirmekte ve FÖET dizel yakıtına göre daha düşük olmaktadır. Motor yükü arttıkça her iki yakıtta da FÖET azalmıştır.



Şekil 3. Motor yükünün ve test yakıtlarının FÖET'ye etkisi (The effects of Engine load and test fuels on FÖET).

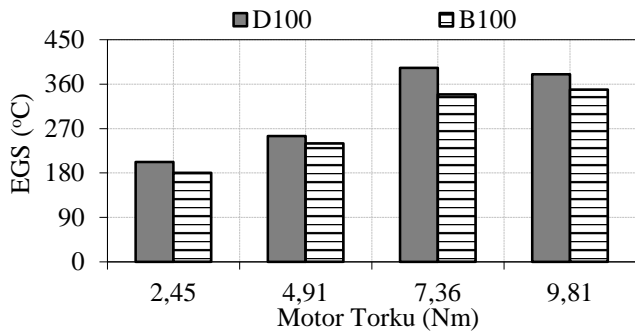
Motor yükü ve test yakıtlarının efektif verim üzerine etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. 7,36 Nm motor yüküne kadar efektif verimde bir artış gözlenmekle birlikte bu değerden sonra hava-yakıt oranının azalması nedeniyle efektif verimdeki artış azalmıştır. Bütün motor yüklerinde B100 yakıtı efektif verim açısından D100 yakıtına göre daha iyi performans göstermiştir. B100 yakıtı için efektif verim en yüksek değeri 7,36 Nm motor yükünde %9,13'lük bir artış göstermiştir. Efektif verim ile FÖET ters orantılı olarak değişir. FÖET azaldıkça efektif verim de artmaktadır.



Şekil 4. Motor yükünün ve test yakıtlarının efektif verime etkisi (The effects of Engine load and test fuels on effective yield).

Motor yükünün B100 ve D100 yakıtlarında Egzoz Gaz Sıcaklığına (EGS) etkisi Şekil 5'te verilmiştir. Her iki yakıt için 7,36 Nm motor yüküne kadar EGS'de artış gözlenmekle birlikte bu motor yükünden sonra D100 yakıtı için EGS'de azalma görülürken B100 yakıtı için EGS'nin artmaya devam ettiği gözlenmiştir. Ancak bu artış çok küçük düzeydedir. B100 yakıtı tüm motor yüklerinde D100 yakıtına göre ortalama 30,5 oC daha düşük EGS'ye sahiptir. Bunun nedeni; biyodizel yakıtının standart dizel yakıtına göre

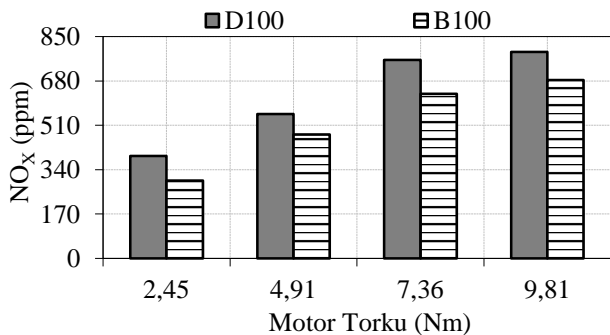
daha uçucu olmasıdır. Genellikle yüksek uçuculuğa sahip yakıtlar buharlaşırken çevrelerinden ısıyı çekerek soğutma etkisi sağlarlar ve EGS'yi düşürürler.



Şekil 5. Motor yükünün ve test yakıtlarının EGS'ye etkisi (The effects of Engine load and test fuels on EGS).

### 3.2. Egzoz Emisyonları (Exhaust Emissions)

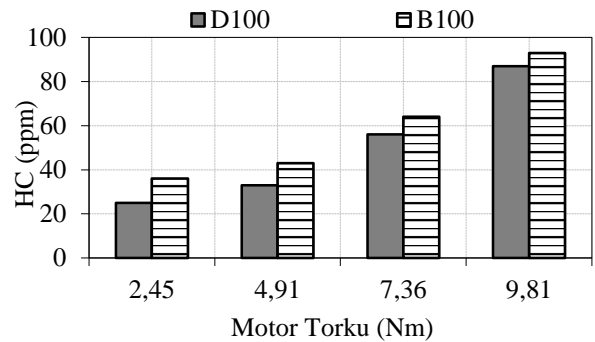
NO<sub>x</sub> emisyonları havanın içerisinde bulunan azotun yüksek sıcaklıklarda oksijen ile reaksiyona girmesi sonucu oluşmaktadır. Şekil 6 incelendiğinde NO<sub>x</sub> miktarının motor yükü artışı ile arttığı görülmektedir. NO<sub>x</sub> miktarının B100 yakıtında D100 yakıtına oranla ortalama %17,26'lık bir düşme olduğu görülmektedir. Bunun sebebi B100 yakıtının alt ısıl değerinin, D100 yakıtına göre daha düşük olmasından dolayı yanma sonu sıcaklıklarının daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar NO<sub>x</sub> emisyonları açısından literatürdeki bazı çalışmalar ile benzerlik gösterirken, bazı çalışmalarda ise farklı sonuçlar göstermiştir.



Şekil 6. Motor yükünün ve test yakıtlarının NO<sub>x</sub> emisyonuna etkisi (The effects of Engine load and test fuels on NO<sub>x</sub> emission).

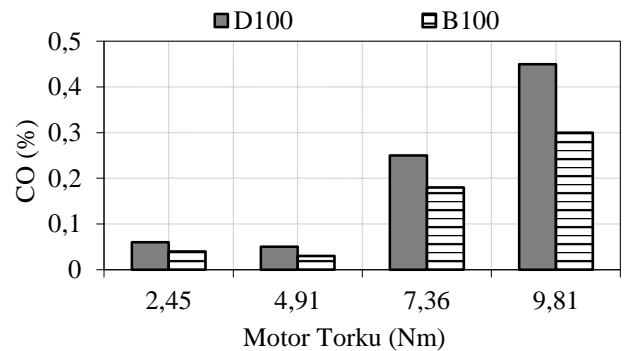
HC emisyonlarının oluşumu silindir içerisine gönderilen yakıtın hepsinin yanmaması sonucu dışarı atılan yakıttan kaynaklanmaktadır. Şekil 7'

de B100 ve D100 yakıtların HC emisyonuna etkisi görülmektedir. Motor yükü arttıkça HC emisyonunun arttığı gözlemlenmiştir. B100 yakıtının HC emisyonunun D100 yakıtına göre ortalama %24 daha yüksek olması B100 yakıtının yoğunluğunun D100 yakıtına göre daha yüksek olduğundan kaynaklanmaktadır. Daha yüksek yoğunluklu yakıtlar karışımı zenginleştirmekte ve HC emisyonlarını artırmaktadır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar HC emisyonları açısından literatürdeki bazı çalışmalar ile benzerlik gösterirken, bazı çalışmalarda ise farklı sonuçlar göstermiştir.



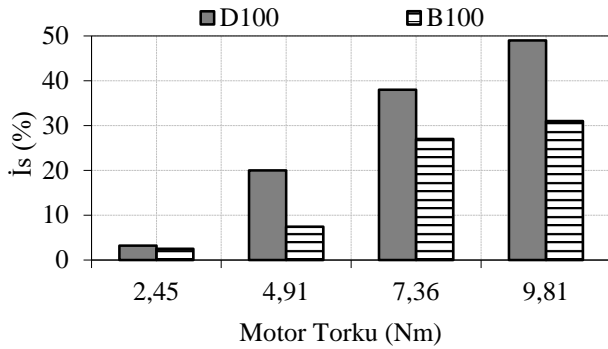
Şekil 7. Motor yükünün ve test yakıtlarının HC emisyonuna etkisi (The effects of Engine load and test fuels on HC emission).

CO oluşumunun gerçek sebebi yeterli oksijen bulunmadığı için yanmanın eksik olmasıdır. Motor yükü arttıkça hava/yakıt oranı azalmakta ve CO miktarı da artmaktadır. Şekil 8'de B100 ve D100 yakıtlarının CO emisyonuna etkisi görülmektedir. Bütün motor yüklerinde B100 yakıtının CO emisyonu D100 yakıtına göre ortalama %33 daha düşüktür. Bunun nedeni, B100 yakıtının yapısında oksijen bulunmasıdır.



Şekil 8. Motor yükünün ve test yakıtlarının CO emisyonuna etkisi (The effects of Engine load and test fuels on CO emission).

Şekil 9'da B100 ve D100 yakıtının is emisyonlarına etkisi görülmektedir. Yakıtın hava ile yeterli düzeyde karışmaması ve karbon taneciklerinin yeterli oksijen bulamaması is emisyonunu artırmaktadır. Yük arttıkça motora verilen yakıt miktarı da arttığı için is emisyonu artan motor yüküne paralel olarak artmıştır. Bütün motor yüklerinde B100 yakıtının is emisyonları D100 yakıtına göre ortalama %31 daha düşük çıkmıştır. B100 yakıtının oksijen içeriğinden dolayı hava/yakıt oranı daha yüksek olduğundan karışım daha fakirdir. Bu durum is emisyonlarının azaltılmasına yardımcı olur.



Şekil 9. Motor yükünün ve test yakıtlarının is emisyonuna etkisi (The effects of Engine load and test fuels on smut emission).

#### 4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

B100 ve D100 yakıtları ile yapılan testler motor performansı açısından değerlendirildiğinde; B100 yakıtı kullanımında D100 yakıtına oranla FÖYT'de yaklaşık %3'lük bir artış, FÖET'de yaklaşık %5'lük bir düşme gözlenmiştir. B100 yakıtı efektif verim açısından D100 yakıtına göre bütün motor yüklerinde ortalama %5,62'lik daha iyi performans göstermiştir. B100 yakıtının tüm motor yüklerinde D100 yakıtına göre ortalama 30,5 oC daha düşük EGS değeri çıkmıştır.

B100 ile D100 yakıtı egzoz emisyonu açısından değerlendirildiğinde, NO<sub>x</sub> miktarının B100 yakıtında D100 yakıtına oranla ortalama %17,26 daha düşük olduğu görülmüştür. HC emisyonu ise; biyodizel ile çalışmada tüm yüklerde ortalama %24 daha yüksek çıkmıştır. B100 yakıtının D100 yakıtına göre CO emisyonunun yaklaşık %33 daha düşük olduğu belirlenmiştir. B100 yakıtının is emisyonları D100 yakıtı is emisyonlarına göre ortalama %31 daha düşük çıkmıştır.

#### 5. SONUÇLAR (RESULTS)

Biyodizel yakıtının motor performansını arttırırken yakıt tüketimini ve egzoz sıcaklığını azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca atık biyodizel yakıtının HC, CO ve is emisyonları bakımından dizel yakıtına göre daha düşük emisyonlar ürettiği görülmüştür. Deney sonuçları, motor yakıt sisteminde herhangi bir değişikliğe gidilmeksizin dizel yakıt yerine atık biyodizel kullanılabileceğini göstermektedir.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Kadıköy Belediyesi, «Evlerden bitkisel atık yağ toplama projesi» [Çevrimiçi]. Available: [http://www.atikyonetimi.kadikoy.bel.tr/Files/atikyag\\_sunum\\_2013.pdf](http://www.atikyonetimi.kadikoy.bel.tr/Files/atikyag_sunum_2013.pdf). [Erişildi: 2016].
- [2] A. Demirbaş, «Importance of biodiesel as transportation fuel,» *Energy policy*, cilt 35, no. 9, pp. 4661-4670, 2007.
- [3] M. Çetinkaya ve F. Karaosmanoğlu, «Biodiesel as a generator fuel,» *8th International Combustion Symposium*, Ankara, 2004.
- [4] R. Behçet ve A. V. Çakmak, «Bir dizel motorda yakıt olarak kullanılan balık yağı metil esteri karışımlarının motor performans ve emisyonlarına etkisi,» *6th International Advanced Technologies Symposium*, Elazığ, 2011.
- [5] İ. Sugözü, F. Aksoy ve Ş. A. Baydır, «Atık motor yağının alternatif yakıt olarak bir dizel motorunda kullanılması,» *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, cilt 1, no. 1, pp. 9-16, 2009.
- [6] R. Behçet, A. V. Çakmak, S. Aydın, C. İlkılıç ve H. Aydın, «Atık kızartma yağı metil esterinin bir dizel motorunda motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin araştırılması,» *6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Elazığ, 2011.
- [7] Y. Sekmen, «Karpuz çekirdeği ve keten tohumu yağı metil esterinin dizel motorlarda yakıt olarak kullanılması,» *Teknoloji Dergisi*, cilt 10, no. 4, pp. 295-302, 2007.
- [8] Y. Sekmen ve A. Aktaş, «Soya yağı metil esterinin motor performans ve egzoz

- emisyonlarına etkileri,» *Politeknik Dergisi*, cilt 11, no. 3, pp. 249-254, 2008.
- [9] H. Oğuz, «Dizel yakıtı-ayçiçek yağı karışımlarının dizel motorlarında yakıt olarak kullanılmasının araştırılması, Yüksek Lisans Tezi,» *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 1998.
- [10] A. M. Ceviz, F. Koncuk, F. Yüksel, Ö. Küçük ve C. A. Gören , «Beş farklı bitkisel yağdan üretilen biyodizeller ile dizel yakıtının motor performans ve emisyon karakteristiklerinin karşılaştırmalı analizi,» *Mühendis ve Makina*, cilt 50, pp. 20-26, 2009.
- [11] Y. Ulusoy, Y. Tekin , M. Çetinkaya ve F. Karaosmanoğlu, «The engine tests of biodiesel from used frying oils,» *Energy Sources*, cilt 26, pp. 927-932, 2004.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 28.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 25.04.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.295487	

## Seebeck coefficient of $\text{Ca}_{2.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Co}_4\text{O}_9$ synthesized by sol-gel method with thermal and structural characterization\*

Enes Kilinc<sup>\*\*1</sup>, M. Abdullah Sari<sup>2</sup>, Fatih Uysal<sup>1</sup>, Erdal Celik<sup>3,4,5</sup>, Huseyin Kurt<sup>1</sup>

### ABSTRACT

In this paper,  $\text{Ca}_{2.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Co}_4\text{O}_9$  powders were synthesized by sol-gel method and thermal and structural characterization of the powders were systematically examined for high temperature thermoelectric generator applications. Differential Thermal Analysis-Thermogravimetry (DTA-TG) was used to specify appropriate thermal regime of the powders for calcination process. Chemical structure and reaction type of intermediate temperature products were defined by Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy. Structural properties of the powders were implemented by X-ray Diffraction (XRD) and X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) was used to specify chemical composition and empirical formula of the elements existed within the powders. It can be seen from the phase spectrum that  $2\theta$  peaks of  $\text{Ca}_{2.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Co}_4\text{O}_9$  correspond to the literature and coincide with typical  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  peaks. Seebeck coefficients of the samples are much higher than  $\text{Ca}_3\text{Co}_4\text{O}_9$  while they are closer to literature value of  $\text{Ca}_{2.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Co}_4\text{O}_9$ . The highest Seebeck coefficient of  $\text{Ca}_{2.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Co}_4\text{O}_9$  is found to be  $179 \mu\text{V}/\text{K}$  at  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  which is a little higher than the literature value. These results show that Pr is an effective dopant to increase the Seebeck coefficient values.

**Keywords:** Seebeck coefficient, sol-gel process, oxide thermoelectrics, thermal analysis.

\* This study has been derived from the proceeding of “Sol-Gel Synthesis of  $\text{Ca}_{2.8}\text{Pr}_{0.2}\text{Co}_4\text{O}_9$  Powders with Thermal and Structural Characterization” presented in the 4<sup>th</sup> International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES 2016).

\*\* Corresponding Author: Address: Karabuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Oda No: 348, 78050, Karabuk, Turkey. E-mail address: eneskilinc@karabuk.edu.tr.

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Karabuk University, Karabuk, Turkey.

<sup>2</sup> The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey.

<sup>3</sup> Center for Production and Application of Electronic Materials (EMUM), Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey.

<sup>4</sup> Faculty of Engineering, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey.

<sup>5</sup> The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Nanoscience & Nanoengineering, Dokuz Eylül University, Izmir, Turkey.

## 1. INTRODUCTION

Thermoelectric (TE) materials have attracted a great deal of attention by converting heat energy into electrical energy directly for TE power generation applications [1]. If p- and n-type materials are connected electrically in series and thermally in parallel coupled with a temperature difference applied between two sides of a thermoelectric generator (TEG), an output voltage is produced. This impact is called the Seebeck effect [2]. Efficiency of a TE material is evaluated by dimensionless figure of merit ( $zT$ ) defined as

$$zT = \frac{S^2T}{\rho\kappa} \quad (1)$$

where  $S$  is the Seebeck coefficient,  $\rho$  is the electrical resistivity,  $\kappa$  is the thermal conductivity, and  $T$  is the temperature. A TE material should have high Seebeck coefficient and low electrical resistivity associated with low thermal conductivity [3].

Recently, TE oxides became advantageous over alloy based intermetallic compounds in terms of high temperature stability, cost of starting materials, easy manufacturing and high temperature application areas [4]. Having looked at oxide TE materials, Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> [5] and ZnO [6] have become important candidates for p- and n-type oxide TE materials with high  $zT$  values at high temperatures. In the past decade, many methods including doping have been used to improve their TE properties. Doping methods are the major approach to improve  $zT$  of bulk materials [7]. Through these studies,  $zT$  values of bulk oxide TE materials have reached to 0.5 at 1000 K and 0.65 at 1247 K for p-type Ca<sub>2.7</sub>Ag<sub>0.3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>/Ag-10 wt.% composite [8] and n-type Zn<sub>0.96</sub>Al<sub>0.02</sub>Ga<sub>0.02</sub>O [9], respectively.

Over the past decades, many synthesis methods have been used to synthesize Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> and ZnO powders such as solid state reaction method [10], self-ignition method [11], combustion synthesis method [12], and sol-gel method [13]. Between these methods, sol-gel synthesis has some advantages among them as better stoichiometry control and homogeneity, lower reaction temperatures, easy fabrication and opportunity of using high-purity precursors [14]. High gas pressure can be applied isostatically along with high

temperatures to all surfaces of a sample by hot isostatic pressing (HIP) to obtain bulk samples [15].

In this study, p-type Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> was manufactured using sol-gel synthesis and HIP in order to investigate TE property of Seebeck coefficient for TEG applications. Synthesis and characterization of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> were performed systematically using Ca, Pr and Co based precursors to identify solution characteristics, process regime, structural properties and elemental composition of the powders. Within this scope, solution characteristics of the precursors were determined by pH and turbidity measurements. Thermal properties of the powders were characterized by Differential Thermal Analysis-Thermogravimetry (DTA-TG) in order to obtain appropriate calcination regime and Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy was used to define chemical structure and reaction type of intermediate temperature products. Structural analysis of the Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders was carried out using X-ray Diffraction (XRD) and results were compared with literature. X-ray Photoelectron Spectroscopy (XPS) was used to specify elemental composition and empirical formula of the elements within the powders. HIP was used to consolidate the powders. In addition to chemical characterizations, Seebeck coefficient values of the bulk samples were observed from 373 K to 673 K to investigate the effects of the fabrication methods and doping of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> samples.

## 2. MATERIALS AND METHOD

In this study, Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders were synthesized using sol-gel method. Calcium nitrate tetra hydrate (99%, Alfa Aesar), praseodymium (III) nitrate hydrate (99.9%, Alfa Aesar) and cobalt (II) nitrate hexahydrate (ACS, Alfa Aesar) were used in stoichiometric ratios as starting materials to obtain 0.02 mole Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>. Distilled water was used as the solvent to dissolve each precursor having fully dispersed and homogenous solutions. After obtaining separate solutions of the precursors, the solutions were mixed and magnetically stirred at 100 °C to obtain final homogeneous solution and citric acid monohydrate was added as chelating agent to accelerate xerogel formation. After gelation process, obtained xerogel was dried at 200

°C for 2 h to remove moisture and undesired gases and Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders were obtained. Amounts of the precursors, solvent and chelating agent were given in **Table 1**.

Table 1. Stoichiometric ratios used for 0.02 mole of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders.

Precursors	Molecular Weight (g/mole)	Amount
Calcium nitrate tetra hydrate	236.15	13.2244 g
Praseodymium nitrate hydrate (III)	291.04	23.2832 g
Cobalt (II) nitrate hexahydrate	326.92	1.3077 g
Distilled water	18	200 ml
Citric acid monohydrate	210.14	4.2028 g

Solution characteristics of the solutions were specified by a turbidimeter and a pH meter, respectively, maintaining turbidity and pH values. A VELP TB1 model turbidimeter was used to measure the turbidity value of the solutions with a measurement range of 0-1000 ntu (nephelometric turbidity unit). Acidic and basis characteristics of the final solution was determined by measuring its pH value with a WTW Inolab pH 720 model pH meter after the dispersion process.

A Perkin Elmer STA 6000 model DTA-TG instrument was used to identify thermal behavior of the dried powders from ambient temperature to 900 °C in air atmosphere with a heating rate of 10 °C/min. Solution evaporation, decomposition and phase formation of the powders were stated as a result of DTA-TG analysis. Prior to XRD analysis, the dried powders were calcined at 800 °C for 2 h resulting as final Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders. XRD pattern of the final powders was identified by a Thermo Scientific ARL model X-ray diffractometer using Cu K<sub>α</sub> irradiation (wavelength,  $\lambda = 1.540562 \text{ \AA}$ ) in the range of  $5^\circ \leq 2\theta \leq 90^\circ$  at a speed of 2°/min to state structural analysis. Elemental composition and element ratios of the powders were described using a A Thermo Scientific K-Alpha model XPS device with an Al K<sub>α</sub> X-ray source between 0-1350 eV energy range.

As-obtained Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders were pre-shaped by a mechanical press at 120 MPa. Next, the samples were subjected to HIP at 700 °C under Ar

gas pressure of 100 MPa for 30 min to consolidate the samples using an AIP HP630 model HIP equipment. After consolidation, the bulk samples were treated for 20 h at 1173 K.

Seebeck coefficient of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> bulk samples were performed between 323 and 673 K using slope method at steady state conditions with a uniaxial 4-point contact arrangement. In this method, thermocouples are inserted through the heaters in direct contact with the sample [16]. In this study, Seebeck coefficient values of the samples were determined using chromel–Nb thermocouples by applying a temperature gradient between +7.5 K and -7.5 K throughout the samples.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

It is important to specify if powder precursors are dissolved completely in solutions in terms of obtaining homogeneous solutions. Within this context, turbidity measurements are performed by inspecting ntu values of the solutions in the range of 0-1000 ntu. A homogeneous solution has been formed if the turbidity value is reputed to be closer to 0, and powder precursors have not been dissolved entirely in solutions if the turbidity value is measured closer to 1000 [17]. In addition, gel formation is affected by the pH value of the solutions and the pH value ought to be regarded during solution preparation. In this work, turbidity and pH values of the prepared solution were found as 0.36 ntu and 1.19, respectively, meaning that the precursors were dissolved very well in the solution and the solution showed acidic characteristics forming a branched structure during the gelation process.

DTA-TG analysis was applied to the Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders dried at 200 °C for 2 h in air with a heating rate of 10 °C per minute in air atmosphere until 900 °C and the results are shown in **Fig. 1**. Endothermic and exothermic reactions occur at the temperature range of 270 °C and 480 °C with reference to DTA curve in the figure. Exothermic peak between 270 °C and 300 is related to burning out of organic residuals containing C based materials. At the same temperature interval, a weight loss of 10% is stated from TG curve due to removal of organic groups. Endothermic peak



between temperatures of 440 °C and 480 °C is regarded to oxidation of Ca, Pr, and Co. A significant weight loss of approximately 30% on the TG curve is observed due to these peaks. Phase formation of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> starts after 480 °C according to the DTA curve and small weight losses were observed depending on the phase formation.

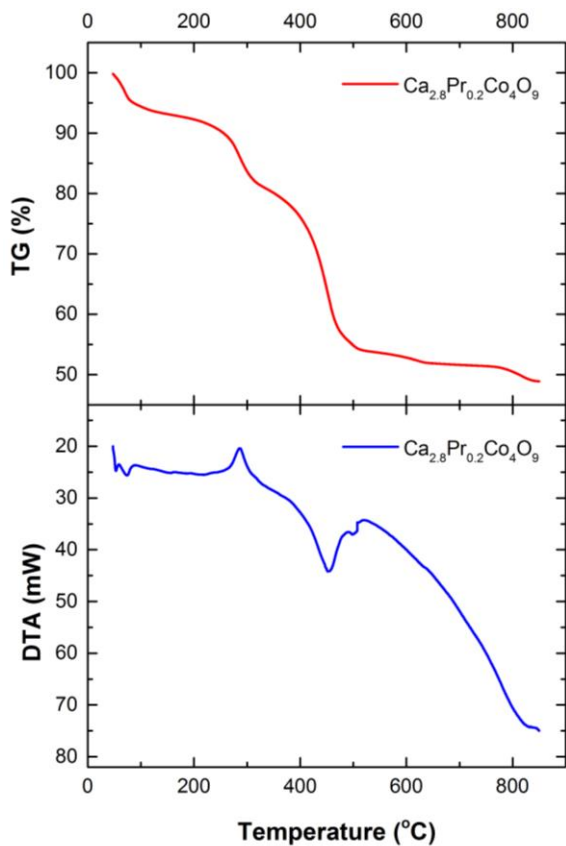


Figure 1. DTA and TG curves of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders dried at 200 °C in air.

XRD pattern of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders manufactured by sol-gel method is shown in Fig. 2. Formation of crystalline structure for Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> particles was depicted with sharp diffraction peaks.  $2\theta$  peaks at 16.54°, 24.86°, 30.30°, 33.38°, 37.22°, 39.56°, 43.46°, 48.68°, and 55.46° seen from the phase spectrum correspond to typical Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> peaks and are agreeable with the literature [18]. Any other phases were not observed in the XRD detection. In addition, average crystalline size of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> particles were determined using the intensities of the primary peaks of reflection at  $2\theta=33.38^\circ$  by the Debye-Scherrer equation [19] which is given as  $D = 0.9\lambda/\beta\cos\theta$ . Here,  $D$  is the average crystalline size,  $\lambda$  is the X-ray wavelength,  $\beta$  is the full width at half the maximum intensity, and  $\theta$  is the Bragg's

diffraction angle. Average crystalline size of the Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> particles was calculated as 27.6 nm using Debye-Scherrer equation.

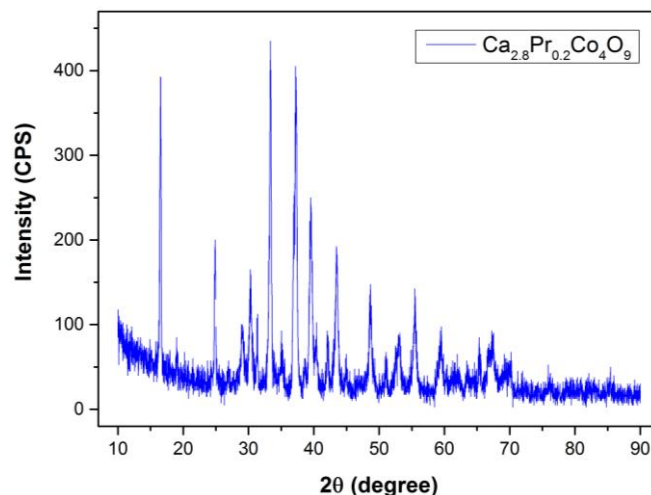


Figure 2. XRD spectra of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders calcined at 800 °C for 2 h in air.

A wide scan XPS spectra of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders was evaluated within the range of 0-1350 eV with an energy step size of 1.0 eV. According to in Fig. 3. Sharp peaks seen in the XPS spectra confirm that elements of Ca, Pr, Co, and O exist within the powder sample corresponding with the peaks. In addition, peaks corresponding to C and Cl are also detected in the spectra. Existence of Cl is the result of distilled water used to dissolve the precursors and C is the result of reaction with CO<sub>2</sub> in air. Table 3 gives elemental analysis and quantification of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders including binding energies (BE) in eV with their corresponding full-width at half maximum (FWHM). Elemental analysis from XPS shows that Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders consist of 14.25% Ca, 38.24% O, 7.21% Co, and 0.46% Pr. It can be noticed from the table that components of Ca 2p, O 1s, Co 2p, and Pr 4d are formed with binding energies of 346.21 eV, 530.05 eV, 780.23 eV, and 115.81 eV, respectively. Although effect of Pr doping cannot be detected in the XRD pattern, presence of Pr dopant can be detected in the XPS spectra. Hence, doping of Pr into Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> was successfully accomplished.

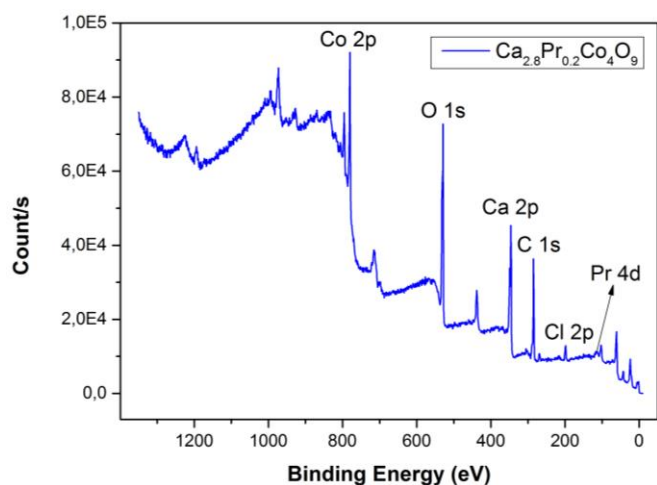


Figure 3. Wide survey XPS spectra of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders.

Table 3. Elemental analysis and quantification of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders.

Peak	Position BE (eV)	FWHM (eV)	Area (cps eV)	Amount (%)
Ca 2p	346.21	3.368	143301.59	14.25
O 1s	530.05	4.451	199972.85	38.24
Co 2p	780.23	3.072	205702.10	7.21
Pr 4d	115.81	3.811	7567.86	0.46

Seebeck coefficients of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> bulk samples are given in Fig. 4 between 100 °C and 400 °C. Since the Seebeck coefficient of the samples are positive, the materials are p-type and holes are the dominant charge carriers. Behavior of Seebeck coefficient for Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> can be explained by Co<sup>+4</sup> concentration based on CoO<sub>2</sub> layers [20]. Doping of Pr<sup>+3</sup> instead of Ca<sup>+2</sup> is considered to increase the hole concentration in the samples and thereby Co<sup>+4</sup> concentration is decreased causing an increase in Seebeck coefficient. Compared to the literature values [20], Seebeck coefficients of the samples are much higher than Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> while they are closer to literature value of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>. The highest Seebeck coefficient of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> is 179 μV/K at 400 °C which is a little higher than the literature value. These results show that Pr is an effective dopant to increase the Seebeck coefficient values. Overall, Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> can be a promising p-type thermoelectric material.

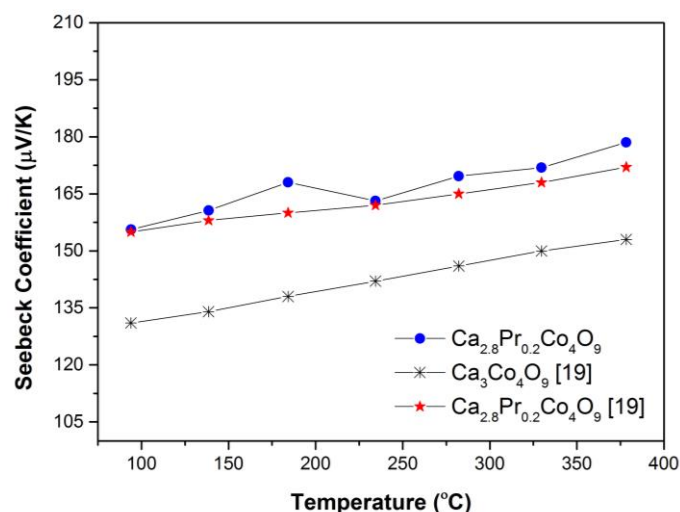


Figure 4. Temperature dependence of Seebeck coefficient for Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>.

#### 4. CONCLUSIONS

This study contains successfully synthesis and characterization of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> powders for high temperature thermoelectric applications using sol-gel method following hot isostatic pressing. Drying, oxidation and phase transformation temperatures of the powders were optimized according to the DTA-TG and FTIR results. Formation of crystalline structure for Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> particles was depicted with sharp diffraction peaks in the XRD pattern corresponding to typical Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> peaks compatible with the literature. In addition, average crystalline size of the Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> particles was calculated as 27.6 nm using Debye-Scherrer equation. Sharp peaks seen in the wide survey XPS spectra confirm that elements of Ca, Pr, Co, and O exist within the powder sample. Although effect of Pr doping cannot be detected in the XRD pattern, presence of Pr dopant can be detected in the XPS spectra. Hence, doping of Pr into Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> was successfully accomplished. Doping of Pr<sup>+3</sup> instead of Ca<sup>+2</sup> is considered to increase the hole concentration in the samples and resulted in an increase in Co<sup>+4</sup> concentration. As a result, Seebeck coefficient of the samples increased with respect to the increase in Co<sup>+4</sup> concentration. Seebeck coefficients of the samples are much higher than Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> while they are closer to literature value of Ca<sub>2.8</sub>Pr<sub>0.2</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>. Maximum Seebeck coefficient of the samples is found to be 179 μV/K at 400 °C. These results show

that Pr is an effective dopant to increase the Seebeck coefficient values.



### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) in Turkey under Project No. 115M579. We would like to thank the Center for Production and Application of Electronic Materials (EMUM) in Dokuz Eylül University in Izmir, Turkey for research collaboration. We appreciate Prof. G. J. Snyder and Dr. Umut Aydemir at Northwestern University in Evanston, IL, USA for Seebeck coefficient measurements.

### REFERENCES

- [1] J. Garcia-Canadas and G. Min, "Multifunctional probes for high-throughput measurement of Seebeck coefficient and electrical conductivity at room temperature," *Rev Sci Instrum*, vol. 85, p. 043906, Apr 2014.
- [2] M. S. Dresselhaus, G. Chen, Z. F. Ren, G. Dresselhaus, A. Henry, and J.-P. Fleurial, "New Composite Thermoelectric Materials for Energy Harvesting Applications," *JOM*, vol. 61, pp. 86-90, 2009.
- [3] S. Bhattacharya, S. Rayaprol, A. Singh, A. Dogra, C. Thinaharan, D. K. Aswal, *et al.*, "Low temperature thermopower and electrical transport in misfit Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> with elongated c-axis," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41, p. 085414, 2008.
- [4] R. Funahashi, M. Mikami, T. Mihara, S. Urata, and N. Ando, "A portable thermoelectric-power-generating module composed of oxide devices," *Journal of Applied Physics*, vol. 99, p. 066117, 2006.
- [5] Y. Song, Q. Sun, L. Zhao, F. Wang, and Z. Jiang, "Synthesis and thermoelectric power factor of (Ca<sub>0.95</sub>Bi<sub>0.05</sub>)<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>/Ag composites," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 113, pp. 645-649, 2009.
- [6] L. Han, N. V. Nong, L. T. Hung, T. Holgate, N. Pryds, M. Ohtaki, *et al.*, "The influence of  $\alpha$ - and  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> phases on the thermoelectric properties of Al-doped ZnO," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 555, pp. 291-296, 2013.
- [7] H. Alam and S. Ramakrishna, "A review on the enhancement of figure of merit from bulk to nano-thermoelectric materials," *Nano Energy*, vol. 2, pp. 190-212, 2013.
- [8] Y. Wang, Y. Sui, J. Cheng, X. Wang, and W. Su, "Comparison of the high temperature thermoelectric properties for Ag-doped and Ag-added Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 477, pp. 817-821, 2009.
- [9] N. Van Nong, N. Pryds, S. Linderroth, and M. Ohtaki, "Enhancement of the thermoelectric performance of p-type layered oxide Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> through heavy doping and metallic nano-inclusions," *Adv Mater*, vol. 23, pp. 2484-90, Jun 3 2011.
- [10] C. Chen, T. Zhang, R. Donelson, D. Chu, R. Tian, T. T. Tan, *et al.*, "Thermopower and chemical stability of Na<sub>0.77</sub>Co<sub>2</sub>/Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> composites," *Acta Materialia*, vol. 63, pp. 99-106, 2014.
- [11] H. Su, Y. Jiang, X. Lan, X. Liu, H. Zhong, and D. Yu, "Ca<sub>3-x</sub>Bi<sub>x</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> and Ca<sub>1-y</sub>SmyMnO<sub>3</sub> thermoelectric materials and their power-generation devices," *physica status solidi (a)*, vol. 208, pp. 147-155, 2011.
- [12] K. Park, H. K. Hwang, J. W. Seo, and W. S. Seo, "Enhanced high-temperature thermoelectric properties of Ce- and Dy-doped ZnO for power generation," *Energy*, vol. 54, pp. 139-145, 2013.
- [13] S. W. Nan, J.; Deng, Y.; Nan, C.W., "Synthesis and thermoelectric properties of (Na<sub>x</sub>Ca<sub>(1-x)</sub>)<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub> ceramics," *Journal of the European Ceramic Society* vol. 23, pp. 859-863, 2003.
- [14] A. Goktas, I. H. Mutlu, Y. Yamada, and E. Celik, "Influence of pH on the structural optical and magnetic properties of Zn<sub>1-x</sub>Mn<sub>x</sub>O thin films grown by sol-gel method," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 553, pp. 259-266, 2013.

- [15] M. H. Bocanegra-Bernal, "Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics," *Journal of Materials Science*, vol. 39, pp. 6399-6420, 2004.
- [16] K. A. Borup, J. de Boor, H. Wang, F. Drymiotis, F. Gascoin, X. Shi, *et al.*, "Measuring thermoelectric transport properties of materials," *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, pp. 423-435, 2015.
- [17] E. Celik, U. Aybarc, M. F. Ebeoglugil, I. Birlik, and O. Culha, "ITO films on glass substrate by sol-gel technique: synthesis, characterization and optical properties," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 50, pp. 337-347, 2009.
- [18] H. Q. Liu, X. B. Zhao, T. J. Zhu, Y. Song, and F. P. Wang, "Thermoelectric properties of Gd, Y co-doped Ca<sub>3</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9+δ</sub>," *Current Applied Physics*, vol. 9, pp. 409-413, 2009.
- [19] M. Rezaei, M. Khajenoori, and B. Nematollahi, "Preparation of nanocrystalline MgO by surfactant assisted precipitation method," *Materials Research Bulletin*, vol. 46, pp. 1632-1637, 2011.
- [20] F. P. Zhang, X. Zhang, Q. M. Lu, J. X. Zhang, Y. Q. Liu, and G. Z. Zhang, "Effects of Pr doping on thermoelectric transport properties of Ca<sub>3-x</sub>Pr<sub>x</sub>Co<sub>4</sub>O<sub>9</sub>," *Solid State Sciences*, vol. 13, pp. 1443-1447, 2011.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 10.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 26.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.291270	

## AISI 1010 çeliği için proses parametrelerinin sabit mandrel ile soğuk boru çekme işlemine etkilerinin sonlu elemanlar analiziyle incelenmesi

Jabbar Gattmah<sup>1,2\*</sup>, Fahrettin Ozturk<sup>3</sup>, Sadettin Orhan<sup>1</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada, sonlu elemanlar analizi kullanılarak, sabit mandrel ile soğuk boru çekme işleminin benzetimi yapılmış olup, kesit daralma oranının, yarı kalıp açısının, yarı mandrel açısının ve sürtünme katsayılarının çekme gerilmesine etkileri araştırılmıştır. Sonlu elemanlar modeli, %16 kesit daralmasındaki deneysel verilerle doğrulanmıştır. Netice olarak, yarı kalıp açısının plastik şekil değişimine etkisi yarı mandrel açısından daha büyük olmuştur. Sebebi ise kalıp açısının büyüklüğünden kaynaklanmaktadır. 12°'lik yarı kalıp açısı bütün sürtünme değerleri için minimum çekme gerilmesini vermektedir. Sabit konik mandrel ile boru çekme işleminde 7°'lik yarı kalıp açısı için 2-4° aralığındaki yarı mandrel açısı kullanılmalıdır. Deneysel ve sonlu elemanlar analiz sonuçlarının uyum içinde olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Soğuk boru çekme, Sonlu eleman analizi (FEA), çekme gerilmesi, yarı kalıp açısı, yarı mandrel açısı

### Effect of the process parameters on cold tube drawing with a fixed plug using finite element analysis for AISI 1010 steel

#### ABSTRACT

In this present work, finite element analysis (FEA) is applied to simulate cold tube drawing process with a fixed plug for AISI 1010 steel tube. The effects of reduction of area, semi die angle, semi plug angle, and friction coefficient on drawing stress are studied. The finite element model is successfully validated with the experimental data at reduction of area 16%. Results indicate that a good agreement between the experimental and the finite element analysis (FEA) is found. Consequently, the effect of semi die angle on plastic deformation is larger than the semi plug angle because of the bigger size of the semi die angle. Semi die angle of 12° gives minimum drawing stress for all coefficient of frictions. A semi plug angle between 2° and 4° should be used in tube drawing process with a conical fixed plug when semi die angle is equal to 7°.

**Keywords:** Tube cold drawings; finite element analysis (FEA), drawing stress; semi die angle; semi plug angle.

\* Corresponding authors, Address: Department of Mechanical Engineering, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Turkey. **Email:** [msc\\_jgj\\_katma7@yahoo.com](mailto:msc_jgj_katma7@yahoo.com), **Phone:**+90 531 7324476.

1 Department of Mechanical Engineering, Ankara Yıldırım Beyazıt University, Ankara, Turkey.

2 Department of Mechanical Engineering, Diyala University, Diyala, Iraq.

3 TAI - Turkish Aerospace Industries, Inc., Ankara, Turkey.

## 1. INTRODUCTION

Tube drawing is one of the technologically important metalworking processes to reduce tube thickness where outside is formed by a drawing die and the inside by a plug or a rod. There is a significant increase in the use of tube products in mechanical applications. However, the quality of tube products and a good surface finish of inner and outer diameters have been concerned. High quality and good surface finish tube products are big challenges in cold tube drawing processes. Basically, four types of tube drawing processes can be considered to reduce outer and inner diameters of the tube. For all of the types, die diameter is used to calibrate the outer diameter, while there are also various other techniques are developed to calibrate inner diameter of the cold drawn tube. These four processes are follow: drawing without a mandrel (tube sinking), drawing over a stationary (fixed) mandrel (plug), drawing over a floating plug, and drawing over a moving mandrel [1]. In this study, the drawing over a stationary mandrel (plug) as shown in Figure 1 was considered. It has been known that finite element analysis (FEA) has been widely used to solve complex metals forming problems. Besides, the rapid technological development in computers field has reduced human effort and cycle time. Although tube drawing process have been taken into consideration by many researchers analytically and numerically, only few researchers have studied cold tube-drawing process experimentally. Because, it is expensive, complex, and requires advanced control during the drawing process.

Tube drawing with a fixed plug or sometime called tube drawing with a fixed mandrel is used to obtain a good surface finish for both the inner and the outer surface of the final tube.

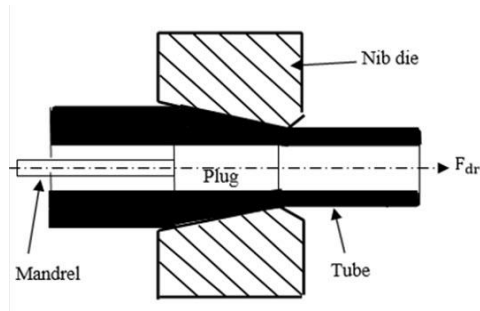


Figure 1. Tube drawing over a stationary mandrel (drawing with a fixed plug)

Tube drawing with a floating plug was studied by Joachim and Endelt [2] using finite element software LS-DYNA with implicit time integration. The study showed that both the length and shape of bearing channel depend on the drawing force with conventional tooling [2]. In another study, Beland et al. [3] used LS-DYNA to determine optimization of tool geometry for reducing stress level for 6063 T4 by a sinker die, a drawing die, and cylindrical plug. The study reveals that three tubes can be drawn at the same time up to maximum length of 12 m at different tube diameters and wall thicknesses. Bihamta et. al [4] studied the effects of die angle, mandrel angle, and fillet radius on the max tube deformation using D-optimal method experimentally and finite element method. AL 6063-0 tube was produced at variable thicknesses. The study proved that the finite element method is an active tool to determine optimum geometry. Cold tube drawing with and without plug was studied by finite element method to improve the quality of finish surface for Cobalt-Chromium alloy tubes [5]. Physical parameters have been analyzed experimentally to identify the constitutive equation, the inelastic heat friction, and the convection of heat transfer. The outcome of the study is that the temperature variation and interface properties affect the local behavior of material significantly. Several mandrel and different diameters have been examined to estimate tube drawing limit and to evaluate ductile failure criteria in a series of drawing test by applying experimental method. SEM images were determined and evaluated. Linardon et. al [6] simulated local stress and strain data that represent a tool of the process optimization. Optimum die profile according to the Arc and Bezier curves was designed by Ref [7] to estimate maximum drawing force and the mean effective strain deviation along the tube thickness. The results showed that the method of die design can give better results of the drawn tubes. Trana et. al [8] developed numerical and experimental approach to determine the drawing efficiency of 6082-0 temper aluminum alloy for cartridge tubes manufacturing. Tensile, compression, and shear tests for the various samples were conducted. The plastic strain and graph of material envelope for zero Lode parameters were determined. Finite element model using 3D LS-DYNA was also improved using a solid element type. The study verified that the drawing degree can be safely determined while

processing cartridge thin tube subjected to inner pressure.

In this research, the effects of reduction of area, semi die angle, semi plug angle, and friction coefficient on drawing stress were studied by reducing tube dimensions (outer diameter, inner diameter, and thickness). Cold tube drawing with a straight plug was done experimentally by a chain assisted machine. The process was performed under lubrication. Finally, the process was modeled by FEA and was validated with the experimental data at reduction area of 16%. The finite element model was used to simulate different reduction of area, semi die and semi plug angles at 23%. Several coefficients of friction; 0.1, 0.125, and 0.15 with constant of velocity were tested. In all our simulations, a commercially available finite element software ABAQUS<sup>TM</sup> was used.

## 2. DIE AND PLUG GEOMETRIES

The die geometries consist of semi die angle, bearing length, and entry radius as displayed in Figure 2. Semi die angle is defined as the slant of die wall toward to the drawing direction [9]. In this study, different semi die angles, fix bearing length of 7 mm and die entry radius of 7 mm were selected for outer diameter reduction analysis when the reduction of area 23%.

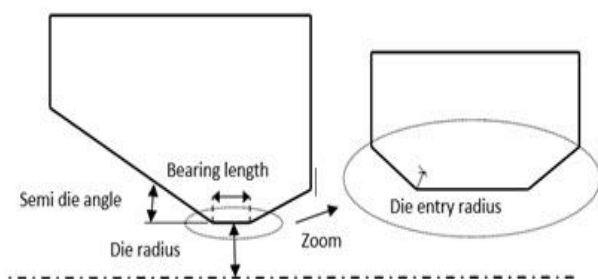


Figure 2. Die geometries

Straight and conical plug geometries were used for deformation of inner diameter. The conical plug includes semi plug angle and nib as shown in Figure 3. Semi plug angle is the slant of plug wall at drawing direction. It has a major role to obtain a good surface finish of inner diameter of drawn pipe.

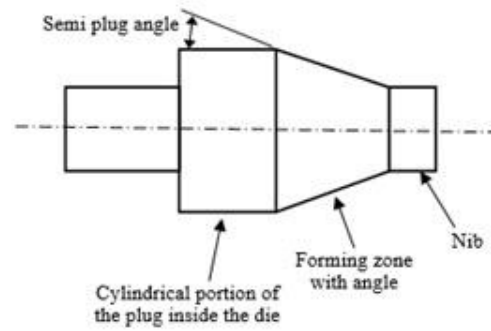


Figure 3. Conical plug geometries

In tube drawing process with a fixed plug, the nib die and plug are very important because of the contact between the internal surface of the die and external surface of tube and the contact between external surface of plug and the internal surface of tube during the drawing process. Nib die and plug are made of tungsten carbide, which has strong corrosion resistance. The mechanical properties of tungsten carbide are density of 15500kg/m<sup>3</sup>, Poisson's ratio of 0.2, and Young's modulus of 650 GPa.

## 3. EXPERIMENTAL WORK

The chain drawing machine did not have load cell, for this reason, a compression test was used to measure force vs. displacement at low velocity. The initial outer and inner diameters of the initial tube are 78 and 71 mm with the initial length for the tube is 70 mm. After compression, the tube moves to 20 mm for  $R = 16\%$ . The tube has a thickness of 3.5 mm. The tube was reduced to outer diameter of 76 mm, inner diameter of 70 mm, and thickness of 3 mm.

## 4. FINITE ELEMENT ANALYSIS

Tube drawing with a fixed plug was modeled by finite element analysis (FEA) software, ABAQUS<sup>TM</sup>6.14-2. For reduction of area 16%, one model was simulated to determine compression force vs. displacement at semi die angle of 15°, semi plug angle of 0° and friction coefficient of 0.1. The geometry was modeled as an axisymmetric to determine the drawing stress. Several reductions of area of 16, 19.4, and 23% were applied. Semi die angles of 5°, 7°, 10°, 12°, and 15° were studied. Semi plug angles were selected as 0°, 1°, 2°, 3°, and 4°. The coefficients of the friction 0.1, 0.125, and 0.15 were used. The mechanical properties and true stress vs. effective

plastic strain values of AISI 1010 steel are presented in Table 1 and Table 2, respectively.

Table 1. Mechanical properties of AISI 1010 steel

Density (g/cm <sup>3</sup> )	7.722
Young's Modulus (E) (GPa)	200
Poisson's Ratio	0.285
Yield Strength (MPa)	560
Ultimate Tensile Strength (MPa)	611
Elongation %	20
Hardness	132 HBW

Table 2. True stress and effective plastic strain of AISI 1010 steel

True stress (MPa)	Effective plastic strain (mm/mm)
563.0296	0
566.4145179	7.53454E-05
576.9544903	0.000590789
587.2014622	0.00147812
602.9924593	0.00329494
610.3349758	0.005004866
613.7224689	0.005953277
615.2229355	0.006735149
617.1610511	0.007879191
619.3638319	0.009385779
620.7268214	0.010837115
621.6564464	0.011986002

In the finite element simulation, a step was defined with proper time increment therefore, solution was easily converged. Dynamic/Explicit solution was used due to the model has complex contact interaction. Arbitrary Lagrangian Eulerian ALE meshing combines the features of pure Lagrangian analysis and pure Eulerian analysis. So, it can be used with explicit, dynamic that allows to maintain a high-quality mesh throughout dynamic analysis and makes the mesh move independently of the material when occurring large deformation or losses of material with the mesh topology remains unchanged. The frictional constraints were defined with the interaction option. In procedure of Explicit/Dynamic, surface-to-surface (explicit) was developed to create an interaction. Finite sliding with a penalty contact method was selected for all contacts to resolve tangential behavior of a mechanical contact. In this method, the compressive force is proportional to the penetration of the material, using the basic concept of the Coulomb friction model. Contact interaction property was selected to define normal behavior (hard contact) and tangential behavior with friction coefficients of 0.1, 0.125, and 0.15. Boundary conditions were applied to move material between

the die and the fixed plug. First, for initial condition the die and the fixed plug were fixed at all direction ( $U_1=0, U_2=0, UR_3 \neq 0$ ). In the second step, velocity 4.25 m/min was applied. It is known fact that the accuracy of simulation results strongly depend on selected element type and mesh size. In this study, a 4-node bilinear axisymmetric quadrilateral, reduced integration, hourglass control element was used as seen in Figure 4.

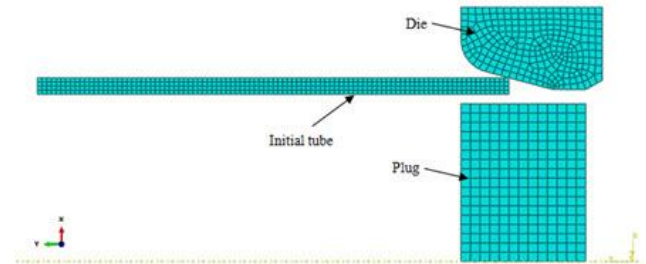


Figure 4. Meshing of axisymmetric tube drawing process with a fixed plug

## 5. RESULTS AND DISCUSSION

### 5.1 Model Validation

First, the proposed model was validated. It was explained earlier that experimental data was measured in order to validate the proposed model. For this reason, compression forces were compared as shown in Figure 5. The figure displays a comparison between the experiment and the finite element results for the case of 16% reduction of area; semi die angle; 15°, semi plug angle; 0°, and the coefficient of friction was 0.1. Based on the comparison, it is clear that a similar compression force vs. displacement diagram was determined. The results show that the experimentally and numerically determined compression forces were 409.44 and 432.212 kN, respectively corresponding displacements of 19.99 and 20 mm. This outcome clearly proves the validation of the model. The difference between two forces was quite small.



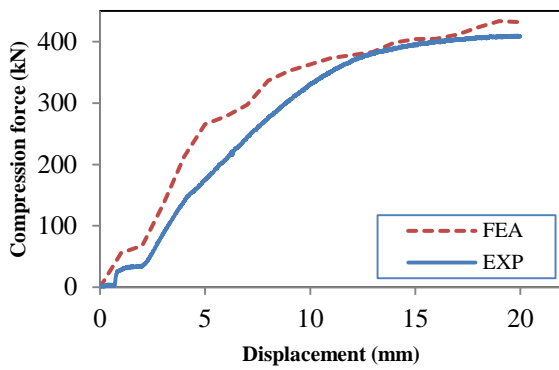


Figure 5. Comparison between experimental and FEA results

## 5.2 Finite Element Results

### 5.2.1 Effect semi die/plug angles on plastic deformations

Figure 6a and 6b show equivalent plastic strain (PEEQ) distribution. In Figure 6a, semi die angle is  $12^\circ$ , semi plug angle is  $0^\circ$ , and coefficient of friction is 0.1 while in Figure 6b, semi die angle is  $7^\circ$ , semi plug angle is  $4^\circ$ , and coefficient of friction is 0.1.

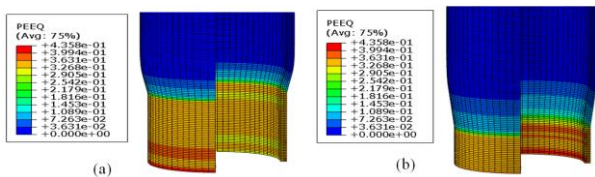


Figure 6. PEEQ axisymmetric finite element models (a) semi die angle of  $12^\circ$  and semi plug angle of  $0^\circ$  (b) semi die angle of  $7^\circ$  and semi plug angle of  $4^\circ$

In Figure 6, it is quite obvious that there is a clear difference in plastic deformation for (a) and (b) due to the change in semi die/plug angles. The plastic deformation occurs as a result of dislocation motions that represent a linear defect in the crystal structures. A preferred orientation is produced since the crystallographic directions gradually rotate toward more stable orientations that represent drawing direction and this lead to isotropic material transforms to anisotropic [10]. The effect of semi die angle is larger than the effect of semi plug angle on plastic deformations due to the increase in plasticity (higher dislocation density) that take place in contact region. In Figure 6a, it can be seen that the plastic deformation of the outer surface of the tube is larger than the inner surface of the tube due to the high effect of semi die angle. In Figure 6b, it can be observed that the effect of the semi die angle is larger than the semi

plug angle. So that, the plastic deformation at the inner surface of the tube is the largest.

### 5.2.2 Effect reduction of area on drawing stress at different friction coefficient

Three reduction of area were selected as (16, 19.4, and 23%) with semi die angle  $15^\circ$ , semi plug angle  $0^\circ$  and coefficients of friction 0.1, 0.125, and 0.15 as displayed in Figure 7. It can be seen that the drawing stress increases with increasing reduction of area for all friction coefficients due to the increase energy consumption at the inlet and the outlet for the forming area and this leads to the increase in the plastic deformation.

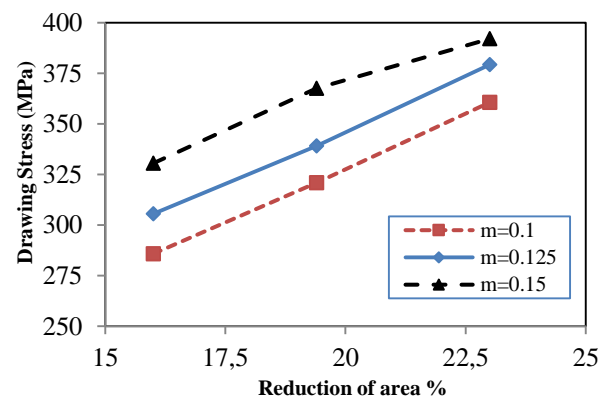


Figure 7. Relationship between the drawing stress and the reduction of area at different friction coefficients

### 5.2.3 Effects semi die angles on drawing stress at different coefficients of friction

The effect of semi die angle on drawing stress with a constant semi plug angle of  $0^\circ$  at different friction coefficients were plotted in Figure 8. The figure indicates that the drawing stress corresponding to the semi die angles of 5 and  $7^\circ$  recorded larger than other semi die angles because of the increase in dislocation density. Semi die angle produces differences of the friction work, as well as it has the effect of the redundant plastic work of deformation [11]. The redundant deformation represents both of friction and shear deformation and it is a radial strain. Therefore, it can be said that, the semi die angle strongly has a strong effects on drawing stress. The minimum drawing stresses were determined at semi die angle of  $12^\circ - 15^\circ$  for friction coefficients of 0.1, 0.125, and 0.15 correspondingly.

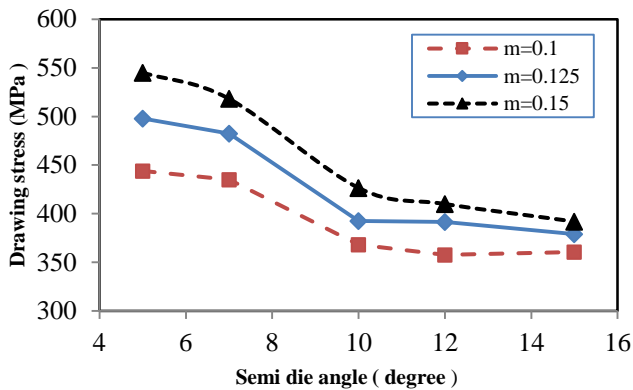


Figure 8. Relationship between drawing stress and semi die angle at different of friction coefficients

#### 5.2.4 Effects semi plug angles on drawing stress at different coefficients of friction

Figure 9 indicates the relationship between semi plug angle and drawing stress at constant semi die angle of  $7^\circ$  at different friction coefficients. The minimum drawing stress was founded with semi plug angle of  $0$  and  $4^\circ$  while the maximum drawing stress was estimated with semi plug angle  $1^\circ$ . There is a possibility to use semi plug angle between  $2$  to  $4^\circ$  which is less than the semi die angle that can give very good surface finish for the internal of tube [12].

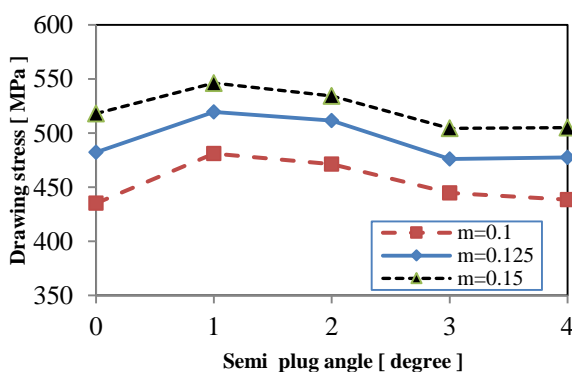


Figure 9. Relationship between drawing stress and semi plug angle at different of friction coefficients

## 6. CONCLUSION

In this work, the FEA was successfully applied for modeling of tube drawing process with a fixed plug. Different semi die/plug angles at different coefficients of friction were studied in order to determine drawing force and stress. Following conclusions were drawn:

1. An axisymmetric model was successfully validated by experimental data.
2. The effect of semi die angle on plastic deformation was larger than semi plug angle because of the bigger size of semi die angle.

3. Drawing stress increases with increasing reduction of area for all coefficients of friction.
4. Semi die angle of  $12$  and  $15^\circ$  gives minimum drawing stress for all coefficient of frictions.
5. A semi plug angle between  $2$  and  $4^\circ$  should be used in tube drawing process with a conical fixed plug when semi die angle is equal to  $7^\circ$ .
6. Drawing stress increases with increasing coefficients of friction for all semi die/plug angles.



## ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Graduate School of Natural Sciences at Ankara Yildirim Beyazit University. Experimental part of the research presented in this paper was funded by Ankara Yildirim Beyazit University. BAP project # 2641. Support of project unit at Ankara Yildirim Beyazit University is greatly acknowledged.

## REFERENCES

- [1] H. Teschaetsch, "Tube Drawing", Metal forming practice, Published by Vieweg Verlag, Dresden, Germany, 2006, p. 105-108.
- [2] T. J. Dankert, B. Endelt, "E. LS-DYNA used to analyze the drawing precision tubes", 7th European LS-DAYNA Conf. 2009.
- [3] J.F. Béland, M. Fafard, A. Rahem, G. D. Amours, T. Côté, "Optimization on the cold drawing process of 6063 aluminum tubes. J Applied Mathematical Modelling 2011, Vol. 35, pp. 5302-5313.
- [4] R. Bihanta, Q.H. Bui, M. Guillot, G. D'Amours, A. Rahem, M. Fafard, "Application of a new procedure for the optimization of variable thickness drawing of aluminum tubes", CIRP J of Manf. Sci. and Technol. 2012, Vol. 5, pp. 142-150.
- [5] M. Palengat, G. Chagnon, D. Favier, H. Louche, C. Linardon, C. Plaideau, "Cold drawing of 316L stainless steel thin-walled tubes: Experiments and finite element analysis", Int. J. of Mech. Sci. 2013, Vol. 70, pp. 69-78.
- [6] C. Linardon, D. Favier, G. Chagnon, B. Gruez, "A conical mandrel tube drawing test designed to assess failure criteria", J. of Mat. Process. Technol., 2014, Vol. 214, pp. 347-357.
- [7] J. J. Sheu, S. Y. Lin, C. H. Yu, "Optimum die design for single pass steel tube drawing with

- large deformation“, J. of Procedia Eng, 2014, Vol. 81, pp. 688-693.
- [8] E. Tran, A. N. Rotariu, P. Lixandru, L. C. Matache, C. Enache, T. Zecheru, “Experimental and numerical investigation on 6082 0 temper aluminum alloy cartridge tube drawing”, J. of Mat. Process. Technol. 2015, Vol. 216, pp. 59-70.
- [9] J. Kasim, "Calculation of relative extrusion pressure for circular section by local coordinate system by using finite element method FEM", Diyala J. of Eng. Sci. 2010, Vol. 03, pp. 80-96.
- [10] J. Chakrabarty, “Foundations of Plasticity“, Theory of plasticity, 3rd ed. Texas: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [11] M.T.P. Aguilar, E.C.S. Corre, R.F. Silva, P.R. Cetlin, “The evaluation of redundant deformation factors in axi-symmetric bar of austenitic stainless steel“, J. of Mat. Process Technol., 2002, Vols. 125-12, pp. 323-325.
- [12] G. E. Dieter, H. A. Kuhan, “Drawing of Wire, Rod, and Tube“, Handbook of workability and process design, ASM International, 2003, p. 278-290.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 31.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 26.04.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.303246	

## GFRP profil aşınma performansının klasik beton aşınma özellikleri ile karşılaştırılması

Ferhat Aydın

### ÖZ

Çeşitli dış etkilerden dolayı yapı elemanlarında aşınmalar meydana gelmektedir. Aşınmaya maruz kalan yapılarda kullanılan yapı malzemelerinin aşınma performansının bilinmesi önemlidir. Bu çalışmada son yıllarda inşaat sektöründe kullanım oranı artan FRP (Fiber Reinforced Plastic) malzemelerden en çok tercih edilen GFRP (Glass Reinforced Plastic) profillerin aşınma davranışı deneysel olarak tespit edilmiştir. Bu amaçla GFRP kutu profillerden hazırlanan numuneler Böhme aşınma test cihazında test edilerek, aşınma oranları liflere dik ve paralel olarak tespit edilmiştir. Ayrıca bu profillerin aşınma performansı 3 dayanım sınıfında üretilen beton numunelerin aşınma sonuçları ile karşılaştırılmıştır. GFRP kutu profillerde lif yönü, beton numunelerde ise dayanımın sınıfının aşınmaya etkileri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** FRP, GFRP, Aşınma, Beton, Dayanım

### Comparison of GFRP profile wear performance with classic concrete wear properties

### ABSTRACT

Structural elements wear due to external influences such as wind, rain and wear. Knowledge of the wear performance of building materials is important for users. Usage rate in the construction sector in recent years increasing FRP (Fiber Reinforced Plastic) material from most GFRP (Glass Reinforced Plastic) profiles are preferred. In this study wear behavior of GFRP profiles are determined experimentally. For this purpose, GFRP box profiles tested in Böhme tester, parallel and perpendicular to the fibers wear rates were determined. Also wear performance of GFRP profiles were compared with the results of the wear strength of concrete samples produced in class 3. Fiber orientation in GFRP box profiles and the effects of strength class in concrete wear are determined.

**Keywords:** FRP, GFRP, wear, concrete, strength

Ferhat Aydın

Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya - ferhata@sakarya.edu.tr

\* Bu çalışma ISITES 2016 sempozyumdan geliştirilerek hazırlanmıştır.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Çok tercih edilen yapı malzemesi olan beton rüzgar, su gibi faktörlerin etkisiyle deforme olmakta, bu etkilerden dolayı beton yüzeyinde aşınmalar oluşmaktadır. Uzun zaman içerisinde gerçekleşen aşınma fiziksel ve mekanik bir olaydır. Malzemelerde aşınmanın etkilerinin anlaşılması için aşınma olayına etki eden ana faktörü yani aşınan malzemeyi ve aşındıran malzemeyi izafi hareketini ve yük durumunu da bilmek gereklidir [1]. Çoğunlukla betondan üretilen kaldırım, döşeme, beton yollar, kıyı koruma yapıları, baraj, tünel, boru, köprü ayağı gibi yapı elemanları büyük oranda aşınmaya maruz kalmaktadır. Aşınma artarak devam ettiğinde taşıyıcı yapı elemanları için ciddi tehlike oluşturabilmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. Aşınma etkisindeki beton yüzeyi (Worn concrete surface) [2]

Beton gibi geleneksel malzemelere alternatif olarak kullanılmaya başlanılan Fiber Takviyeli Plastik (FRP) kompozitlerin yapı sektöründeki kullanımı her geçen gün artmaktadır. FRP kompozitler yüksek çekme dayanımı, hafiflik, korozyon dayanımı ve kimyasallara karşı yüksek direnç, elektrik yalıtımı gibi birçok avantaja sahiptir [3]. Araştırmacılar mevcut inşaat uygulamaların büyük bir kısmında FRP kompozitlerin iyi bir çözüm olabileceği düşünmektedirler [4]. Yapılarda sıklıkla bu FRP kompozitler betonla birlikte kullanılmaktadır [5-9]. Farklı lif türlerinde üretilebilen bu malzemelerden ekonomik nedenlerle en çok Cam Fiber Takviyeli Plastik (GFRP) kompozitler tercih edilmektedir. Pultrüzyon metoduyla üretilen bu kompozit profiller üniform kesite sahip ve hem katı hem de içi boş olarak üretilebilmektedir (Şekil 2).

Uçak ve uzay endüstrisinde 50 yılı aşan mükemmel performansı bu kompozitlerin inşaat sektörüne güvenilir şekilde girmesini sağlamıştır [11]. FRP kompozitler yapılarda güçlendirme, beton donatısı olarak kullanılmasının yanında farklı kesitlerde profiller olarak kule, köprü, konut gibi uygulamaları da artmaktadır (Şekil 3).



Şekil 2. GFRP Profil (GFRP profile) [47]



Şekil 3. GFRP Profiller ile Üretilmiş Yapılar (GFRP Constructs)

GFRP malzeme üzerinde yapılan aşınma performans çalışmaları [12-17] genellikle kullanılan test yöntemi ve malzeme türü farklı olmakla birlikte beton ile aynı test düzeneğinde karşılaştırma yapılmamıştır. Bu çalışmada farklı dayanımlara sahip beton numuneler ile GFRP kutu profil numuneler Böhme aşınma test yöntemi kullanılarak farklı lif yönlerinde test edilmiş ve grafik olarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

GFRP profiller sahip olduğu avantajlarla birlikte aşınma etkisine maruz beton yapı elemanlarına alternatif olarak düşünülmesi için aşınma performansının bilinmesi gereklidir. Bu amaçla farklı dayanımlarda üretilen beton numunelere ile aynı aşınma testine tabi tutulmuş ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Ham maddesi plastik olan bu kompozitler su ve nem geçirimsizliğinin yanı sıra aşınma performansı da kullanıcılar için önemli bir etkidir.

## 2. MALZEME VE METOT (MATERIALS AND METHODS)

GFRP profiller ile farklı dayanımdaki betonların aşınma performanslarının karşılaştırılması amacıyla Böhme aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. GFRP profillerde liflere paralel ve liflere dik olmak üzere her numune türünden 74x74x74 mm boyutlu 12 adet numune, toplam 24 adet numune test edilmiştir. Beton numunelerde ise C20, C30 ve C40 olmak üzere 3 dayanım sınıfında her dayanım sınıfından 6 adet olmak üzere toplam 18 adet beton numune 71x71x71 mm boyutlarında

test edilmiştir. Tüm numunelerin ağırlıkça ve boyca aşınma kayıpları yüzde olarak belirlenmiştir.

## 2.1. Malzeme (Material)

Aşınma testlerinde kullanılan GFRP profillerin (Şekil 4) fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Testler sonucunda GFRP malzemelerin Birim Ağırlık değeri  $1.75 \text{ g/cm}^3$ , Özgül Ağırlığı 1.81 olarak bulunmuştur. Bu profillerin lif doğrultusuna paralel Elastisite modülü (E)  $29344 \text{ N/mm}^2$  ve Çekme Dayanımı ise ortalama  $554 \text{ N/mm}^2$  bulunmuştur. Ayrıca GFRP profillerin fiber-matris hacim yüzdeleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. GFRP Profil Lif Oranı (GFRP Profile Fiber Ratio)

	Boyuna Lif Oranı	Enine Lif Oranı	Matris
Lif Hacmi (%)	41.59	8.76	49.64

GFRP profil aşınma sonuçları ile karşılaştırmak amacıyla 3 farklı dayanımda üretilen betonların karışım oranları ( $1000 \text{ dm}^3$ ) Tablo 2’de verilmiştir. GFRP kutu profil ve beton aşınma numuneleri Şekil 5’te görülmektedir.



Şekil 4. GFRP Profil Numuneler (GFRP Profile Samples)

Tablo 2. Beton karışım oranları (Concrete mix ratios)

( $\text{dm}^3$ )	C20/25	C30/37	C40/50
Su	170	158	146
Çimento	105	111	119
Akışkanlaştırıcı	-	2	4
Kum	336	338	339
I nolu micir	379	381	382
Hava	10	10	10
Toplam	1000	1000	1000



Şekil 5. GFRP Kutu Profil ve Beton Aşınma Numunesi (GFRP Box Profile and Concrete Wear Sample)

## 2.2. Metot (Method)

Böhme aşınma cihazı 750 mm çapındaki diske sahip, 30 devir/dk hızla dönen, her 22 devir tamamlandığında, cihazı otomatik olarak durduracak tertibata sahiptir. Cihaza yerleştirilecek numune boyutları  $71 \times 71 \times 71 \text{ mm}$  lik küp numunelerdir. Disk üzerine 20 gr zımpara tozu serpilerek toplamda  $22 \times 16 = 352$  devir sonunda ölçümler alınmıştır.

Yapılan testler sonucunda elde edilen veriler tablo ve grafik halinde hazırlanmış ve yorumlanmıştır. Şekil 6’da beton ve GFRP kutu profillerin aşınma testleri görülmektedir.



Şekil 6. Böhme Test Cihazı (Böhme test machine)

## 3. DENEY SONUÇLARI (TEST RESULTS)

Aşınma testleri sonunda elde edilen değerler kullanılarak gerekli hesaplamalar yapıлып, tablolar halinde % aşınma ortalamaları verilmiştir. Beton numuneler ile yapılan testlerde hesaplanan değerler C20, C30 ve C40 dayanım sınıfında Tablo 3-5’te görülmektedir.

Tablo 3. C20 Beton Numunelerin Aşınma Sonuçları (C20 Concrete Wear Results)

No	Boy Kaybı %	Ağırlık Kaybı %
1	1.13	0.63
2	1.40	0.66
3	1.68	0.63
4	1.39	0.88
5	1.80	0.51
6	1.27	0.74
Ort.	1.44	0.67

Tablo 4. C30 Beton Numunelerin Aşınma Sonuçları ((C30 Concrete Wear Results)

No	Boy Kaybı %	Ağırlık Kaybı %
1	1.13	0.67
2	1.06	0.53
3	1.05	0.72
4	1.26	0.61
5	1.26	0.45
6	1.13	0.54
<b>Ort.</b>	1,15	0,59

Tablo 5. C40 Beton Numunelerin Aşınma Sonuçları (C40 Concrete Wear Results)

No	Boy Kaybı %	Ağırlık Kaybı %
1	0.97	0.56
2	1.13	0.53
3	1.12	0.44
4	0.99	0.49
5	1.12	0.35
6	0.99	0.47
<b>Ort.</b>	1,05	0,47

Farklı dayanımlarda test edilen beton numunelerin Böhme aşınma test sonuçlarına göre C20 dayanım sınıfında ortalama boy kaybı %1.44 ve ağırlık kaybı %0.67 bulunmuştur. C30 dayanım sınıfında boy kaybı %1.15 ve ağırlık kaybı % 0.59, C40 dayanım sınıfında ise boy kaybı %1.05 ve ağırlık kaybı % 0.47 hesaplanmıştır. Beton boy aşınma oranlarına göre C20 dayanım sınıfındaki betonlara göre C30 betonlar %20, C40 betonlar %27 daha az boy kaybına sahiptir. Beton ağırlık kayıp oranlarına göre C20 betonlara göre C30 betonlar %12, C40 betonlar yaklaşık %30 daha az ağırlık kaybına sahip olduğu hesaplanmıştır. C40 betonlar C30 betonlara göre boyca %9 ağırlıkça %20 daha az aşınma kaybına uğramıştır. Dayanım sınıfı arttıkça betonlardaki aşınmanın azaldığı tespit edilmiştir. GFRP kutu profillerin liflere paralel aşınma test sonuçları Tablo 6'da, Liflere dik aşınma sonuçları Tablo 7'de verilmiştir.

GFRP profil liflere paralel aşınma test sonuçlarına göre boy kaybı %0.79 ve ağırlık kaybı %3.35 bulunmuştur. Liflere dik aşınma sonuçlarına göre ise boy kaybı %0.82 ve ağırlık kaybı % 4.53'tür. GFRP profillerin liflere paralel ve dik boyca aşınma sonuçları %0.79 ve %0.82 çok yakın çıkmıştır. Ağırlık kayıplarında liflere dik aşınma liflere paralel aşınma oranına göre %35 daha fazla aşınmıştır. Liflere dik aşınma miktarının fazla

olmasının nedeni olarak aşınma esnasında cam liflerin de polimer ile birlikte aşındığı fikrini ortaya çıkarmıştır.

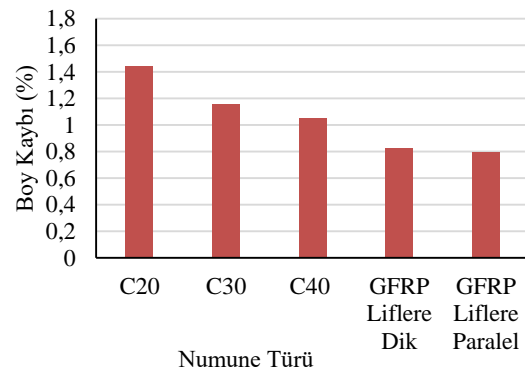
Tablo 6. GFRP Profil Liflere Paralel Aşınma Sonuçları (Parallel to the fibers GFRP Profile Wear Results)

	Boy Kaybı %	Ağırlık Kaybı %
1	0.95	3.29
2	0.93	2.67
3	0.74	3.48
4	0.84	3.40
5	0.74	3.17
6	0.71	3.50
7	0.67	3.78
8	0.92	3.11
9	0.82	3.97
10	0.67	2.99
11	0.79	3.29
12	0.69	3.55
<b>Ort.</b>	0,79	3,35

Tablo 7. GFRP Profil Liflere Dik Aşınma Sonuçları (Perpendicular to the fibers GFRP Profile Wear Results)

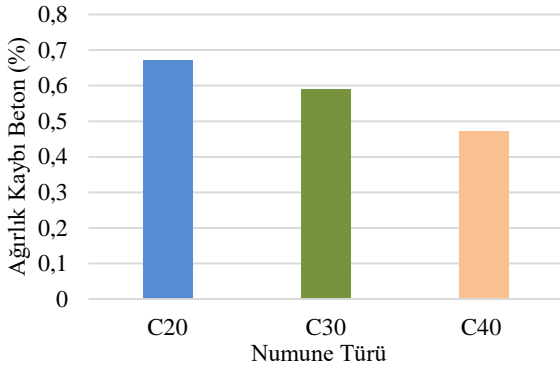
	Boy Kaybı %	Ağırlık Kaybı %
1	0.77	4.42
2	0.71	4.03
3	0.84	4.94
4	0.77	4.88
5	0.73	4.66
6	0.82	5.59
7	0.79	4.38
8	0.83	3.98
9	0.90	5.57
10	0.89	3.48
11	0.96	4.26
12	0.83	4.20
<b>Ort.</b>	<b>0,82</b>	<b>4,53</b>

Boy kayıplarına göre beton numuneler ve GFRP kutu profiller aşınma sonuçları aynı grafik üzerinde karşılaştırılmıştır (Şekil 7).



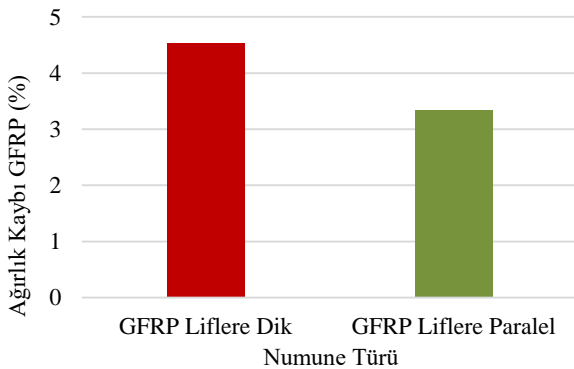
Şekil 7. Tüm Numuneler Boy Kayıpları (Length Losses for All Numbers)

Boy kayıplarına göre GFRP profil liflere dik ve paralel aşınma oranları tüm beton dayanım sınıfları aşınma oranından düşük çıkmıştır. GFRP profillerde liflere paralel aşınma değerleri C40 betonlara göre %38, C30'a göre %31 ve C40 betonlara göre %25 daha az aşınma oranına sahiptir. Liflere dik boy kayıpları liflere paralel boy kayıplarına çok yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Numune ağırlık kayıpları Şekil 8 ve 9'da verilmiştir.



Şekil 8. Beton Numune Ağırlık Kayıpları (Concrete Weight Losses)

Ağırlık kayıpları beton ve GFRP profiller için ayrı grafikler halinde verilmiştir. Beton numunelerde ilk ağırlık 850-900 gr civarında olduğundan yüzde oranları betonun yoğunluğuna bağlı olarak düşük çıkmaktadır. GFRP profillerde ise içi boş profil ve düşük yoğunluktan dolayı beraber karşılaştırma yapmak yanıltıcı olmaktadır. Tüm numune türleri için birim alandaki hacim kayıpları değerlendirildiğinde GFRP profil liflere dik ortalama aşınma  $0,06 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ , liflere paralel  $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  hesaplanmıştır. Betonlarda C40 için  $0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ , C30 için  $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  ve C20 için  $0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  bulunmuştur.



Şekil 9. GFRP Profil Ağırlık Kayıpları (GFRP Profile Weight Losses)

#### 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)



Yapılan aşınma testleri sonucunda elde edilen sonuçlar ve öneriler aşağıda özetlenmiştir:

- C20 dayanım sınıfında boy kaybı %1.44 ve ağırlık kaybı %0.67 bulunmuştur. C30 dayanım sınıfında boy kaybı %1.15 ve ağırlık kaybı % 0.59, C40 dayanım sınıfında ise boy kaybı %1.05 ve ağırlık kaybı %0.47 hesaplanmıştır.
- Boy kaybı aşınma oranlarına göre C20 dayanım sınıfındaki betonlara göre C30 betonlar %20, C40 betonlar %27 daha az boy kaybına sahiptir.
- Ağırlık kayıp oranlarına göre C20 betonlara göre C30 betonlar %12, C40 betonlar yaklaşık %30 daha az ağırlık kaybına sahip olduğu hesaplanmıştır. C40 betonlar C30 betonlara göre boyca %9 ağırlıkça %20 daha az aşınma kaybına uğramış ve beton dayanımı arttıkça betonlarda aşınması azalmaktadır.
- GFRP profil liflere paralel aşınma test sonuçlarına göre boy kaybı %0.79 ve ağırlık kaybı %3.35 bulunmuştur. Liflere dik aşınma sonuçlarına göre ise boy kaybı %0.82 ve ağırlık kaybı %4.53'tür. GFRP profillerin liflere paralel ve dik boyca aşınma sonuçları %0.79 ve %0.82 çok yakın çıkmıştır.
- Ağırlık kayıplarında liflere dik aşınma liflere paralel aşınma oranına göre %35 daha fazla aşınmıştır. Bunun nedeni olarak liflere dik aşınmada cam liflerin de polimer ile birlikte aşındığı düşünülmektedir.
- Boy kayıplarına göre GFRP profil liflere dik ve paralel aşınma oranları tüm beton dayanım sınıflarından aşınma oranı düşük çıkmıştır. Liflere paralel aşınma değerleri C40 betonlara göre %38, C30'a göre %31 ve C40 betonlara göre %25 daha az aşınma oranına sahiptir.
- Birim alandaki hacim kayıpları değerlendirildiğinde GFRP profil liflere dik ortalama aşınma  $0,06 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ , liflere paralel  $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  hesaplanmıştır. Betonlarda C40 için  $0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$ , C30 için  $0,04 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  ve C20 için  $0,05 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  bulunmuştur.
- GFRP profiller hafiflik, çekme ve korozyon dayanımı gibi özelliklerin yanı sıra yeterli aşınma performansına sahiptir. Dolayısıyla bu kompozitlerin aşınma ve su etkisine maruz kıyı yapıları, köprü ayakları, rıhtımlar gibi uygulamalarda kullanılması önerilmektedir.



**KAYNAKÇA (REFERENCES)**

- [1] Binici H., Bahşude, E. G. Durgun, M. Y. Yüksek Fırın Cürufu ve Bazaltik Pomza Katkılı Betonların Mekanik Aşınma ve Su Geçirimsizliği, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi 2010.
- [2] www.fhwa.dot.gov.tr.pupliciations
- [3] Aydın F. Cam Lifi Takviyeli Plastik (GFRP) Kompozit ve Beton ile Üretilen Hibrit Yapı Elemanlarının Mekanik Performansının Araştırılması, Sakarya Üniversitesi, Doktora Tezi, 2011.
- [4] Cripps, A. Fiber Reinforced Polymer Composites In Construction, Construction Industry Research & Information Association (CIRIA), February, 2002.
- [5] Hadi, M.N.S. Behaviour of FRP Wrapped Normal Strength Concrete Columns Under Eccentric Loading, Composite Structures, 72 503–511, 2006.
- [6] Teng, J.G., Chen, Jf, Smith, St., Lam, L. FRP Strengthened RC Structures, John Wiley, 2002.
- [7] Clarke, JL., Strengthening Concrete Structures With Fibre Composites, Struct Build;156(1):49-50, 2003.
- [8] Koksall, H.O. Doran, A. and Turgay, T. A Practical Approach For Modeling FRP Wrapped Concrete Columns, Construction and Building Materials, 23(3), 1429–1437, 2009.
- [9] Weijian, Y. and Hung, H. Experimental Study On The Flexural Behavior of Beams Strengthened With CFRP Laminates, Proc. of the International Conference on FRP, Composites in Civil Engineering, Hong Kong, China, pp. 399-405. 12-15 December 2001.
- [10] Sarıbiyık, M., Elmas, M., Özdemir, S., Ünal, H., Çağlar, N. ve Aydın, F., TÜBİTAK sonuç raporu, Sera Tasarımında Pultrüzyon Metoduyla Üretilen Cam Fiber Takviyeli Plastiklerin Kullanılması, Sakarya, Şubat 2008.
- [11] Ayman, M. Composites: Construction Materials For The New Era, Advance Polymer Composites for Structural Applications in Construction (ACIC), pp.45-58, 2004.
- [12] V.K. Srivastava, S. Wahne Wear and friction behaviour of soft particles filled random direction short GFRP composites Materials Science and Engineering A. 458. 2007, 25–33.
- [13] L. Lasri a, M. Nouari, M. El Mansori, Wear resistance and induced cutting damage of aeronautical FRP components obtained by machining, Wear 271 2011, 2542–2548.
- [14] V.K. Srivastava, Effects of wheat starch on erosive wear of E-glass fibre reinforced epoxy resin composite materials, Materials Science and Engineering A, 435–436 2006, 282–287.
- [15] Hasim Pihitli, An experimental investigation of wear of glass fibre–epoxy resin and glass fibre–polyester resin composite materials European Polymer Journal, 45 2009, 149–154.
- [16] Jumahat, S. Kasolang, M.T. Bahari, Wear properties of nanosilica filled epoxy polymers and FRP composites A. Jurnal Tribologi, 6 2015, 24-36.
- [17] Chandru B G. and G S Shivashankar. Preparation and Evaluation of Mechanical and Wear Properties of Hybrid FRP Composites, Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. 2012.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 25.11.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 02.05.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.268874	

## Betonarme kirişlerin deneysel ve teorik burulma momenti değerlerinin karşılaştırılması

Abdülkadir Cüneyt Aydın<sup>\*1</sup>, Barış Bayrak<sup>2</sup>

### ÖZ

Betonarme kiriş elemanlarda etriye oranı, beton sınıfı ve beton tipinin burulma davranışının üzerinde etkisinin deneysel olarak incelenmesi bu çalışmanın temelini oluşturmaktadır. Deneylerde beton basınç dayanımı 20 MPa ile 40 MPa, beton tipi geleneksel beton ile kendiliğinden yerleşen beton ve etriye aralığı 80 mm ve 100 mm çalışmanın ana parametreleri olarak belirlendi. 12 adet normal betonlu 8 adet kendiliğinden yerleşen betonlu 250x300x1500 mm boyutlarında kiriş numunesi hazırlandı. Burulma momentine maruz bırakılan kiriş numunelerinin burulma momenti kapasiteleri, bu değere karşılık gelen dönme açısı, kritik burulma momenti değerleri, bu değerlere karşılık gelen kritik dönme açıları, burulma çatlakları deneysel olarak ölçüldü. Elde edilen deneysel burulma momenti kapasitesi sonuçları elastik, plastik ve yanal eğilme teorileri ile karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlara en yakın değerler yanal eğilme teorisinde elde edildi. Kiriş numunelerinin burulma momenti kapasitesi-dönme açısı grafikleri çizildi. Düşük etriye aralığının, yüksek dayanımlı betonun ve beton tipi olarak kendiliğinden yerleşen betonun burulma davranışı üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu deneysel olarak bu çalışma kapsamında belirlendi. Deneysel kritik burulma momenti değerleri ilgili çalışmalardan elde edilen ampirik değerlerin karşılaştırılması yapıldı.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme kiriş, burulma momenti, kendiliğinden yerleşen beton, yanal eğilme teorisi

### The comparison of the experimental and theoretical torsional moment results of reinforcement concrete beams

#### ABSTRACT

The experimental investigation effect on the torsional behavior of web spacing, concrete class and concrete type of reinforcement concrete beams constitute basis of this work. The compressive strength of concrete, 20 MPa and 40 MPa, the type of concrete, conventional concrete and self-compacting concrete, web spacing of 80 mm and 100 mm, was determined the main parameters of this work. 12 unit of conventional concrete beams and 8 unit of self-compacting concrete beams of 250x300x1500 mm was manufactured. The torsional moment capacities and corresponding rotation angle values, the critical torsional moment values and corresponding critical rotation angles, torsional cracks of the beam samples that subjected to the torsion was measured experimentally. The torsional moment capacity results that were measured experimentally

<sup>1</sup> Ataturk University, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, 25240, Erzurum, Turkey.  
e-mail: [acaydin@atauni.edu.tr](mailto:acaydin@atauni.edu.tr)

<sup>2</sup> Ataturk University, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, 25240, Erzurum, Turkey.  
e-mail: [baris.bayrak@atauni.edu.tr](mailto:baris.bayrak@atauni.edu.tr)

were compared with the elastic, plastic and skew-bending theories. The most closed results were get to the skew-bending theory. The graphic of torsional moment capacity- unit rotational angles were plotted. The low web spacing, high concrete class and self-compacting concrete type that have a positive effect on the torsional behavior was determined experimentally in this study. Experimental critical torsion values were compared with empirical values obtained from related studies.

**Keywords:** Reinforced concrete beam, torsional moment, self-compacting concrete, skew-bending theory

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Betonarme kiriş elemanlarda burulma momentine gerek Türk Standardında gerekse uluslararası standartlarda fazla yer verilmemektedir. Betonarme kirişlerin donatılabilmesi yapılırken eğilme momenti yeterli görülmektedir. Bu çalışma kapsamında burulma momentine maruz kalan betonarme kirişlerin burulma davranışları incelenmiştir. Burulma davranışı incelenirken de son yıllarda beton teknolojisinde yükselen bir trende sahip olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) ve normal beton kullanılmıştır. Bu çalışmanın ana parametrelerinden olan burulma ve KYB' nin detaylı bir şekilde incelenmesinde fayda vardır.

## 2. GENERAL REQUIREMENTS

### 2.1. Burulma Momenti (Torsional Moment)

Burulma, burulma momenti etkisinde aynı eksen üzerinde eleman en kesitlerinin dönmesi olarak tanımlanır. Burulma olayı eleman en kesitlerinde kayma gerilmeleri meydana getirir ve elemanda kesit düzeyinde meydana gelir. Burulma momenti uygunluk ve denge burulması olmak üzere ikiye ayrılır. Uygunluk burulması hiperstatik sistemlerde şekil değişimlerin sürekliliği sonucu ortaya çıkan ve sistemde denge kaybına neden olmayan burulma şeklidir. Denge burulması ise taşıma gücü ve kullanılabilirlik sınır durumlarında taşıyıcı sistemdeki dengenin sağlanması için hesaba katılması zorunlu olan ve hem hiperstatik hem de izostatik sistemlerde görülen burulma şeklidir [1]. Betonarme kirişlerde meydana gelen burulma momentinin değeri çeşitli teorilerle hesaplanmaktadır. Bu çalışmada dünya genelinde kabul görmüş elastik, plastik ve yanal-eğilme teorileri üzerinde duruldu.

Burulma momentine maruz kalan betonarme kirişlerde meydana gelen kayma gerilmeleri ilk başlarda elastik teoriye göre hesaplanıyordu. Bu teoriye göre maksimum kayma gerilmelerinin

kirişin uzun kenarının orta noktasında meydana geldiği kabul ediliyordu. Kiriş en kesitinde meydana gelen kayma gerilmeleri Şekil 1a' da görülmektedir. Ayrıca elastik teoriye göre burulma momentini ( $T_e$ ) Denklem 1' de verilmiştir [2].

$$T_e = \alpha_e x^2 y f_{ctk} \quad (1)$$

Burada,  $\alpha_e$  elastik teori sabitini,  $x$  kiriş en kesitinde kısa kenarı,  $y$  kiriş en kesitinde uzun kenarı,  $f_{ctk}$  betonun karakteristik çekme dayanımını ifade etmektedir.

Nylander 1955 yılında elastik teori denklemini baz alarak plastik teoriyi denklemini oluşturmuştur. Plastik teoriye göre burulma momentini ( $T_p$ ) Denklem 2' de verilmiştir. Plastik teoriye göre kayma gerilmeleri Şekil 1b' de de görüleceği üzere kesitin karşılıklı yüzeylerinde aynı büyüklükte fakat ters yönde meydana gelmektedir [2].

$$T_p = \alpha_p x^2 y f_{ctk} \quad (2)$$

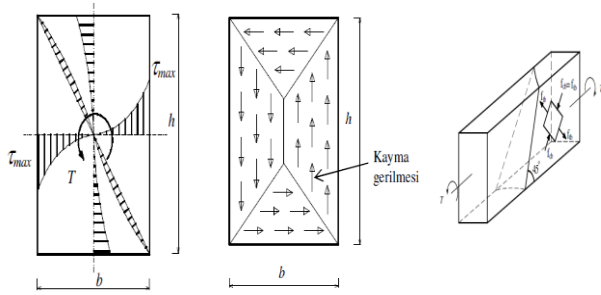
$$\alpha_p = \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{6} \frac{x}{y} \right) \quad (3)$$

Burada,  $\alpha_p$  plastik teori sabitini ifade etmektedir.

Yanal-eğilme teorisine göre betondaki ilk çatlama kirişin büyük yan yüzeylerinden birinde 45 derecelik bir açı ile başlar ve çatlak alt ve üst yüzeylere diyagonal olarak uzanır. Daha sonra kirişin dördüncü yüzeyinde mevcut çatlak uçlarını birleştiren doğru üzerinde betonun aniden kırılmasıyla Şekil 1c' de gösterildiği gibi eleman kırılır [3]. Yanal eğilme teorisine göre burulma momentini ( $T_y$ ) Denklem 4' de verilmiştir.

$$T_y = \frac{x^2 y}{3} f_{cts} \quad (4)$$

Burada,  $f_{cts}$  betonun yarmada çekme dayanımını göstermektedir.



Şekil 1. a) Elastik b)Plastik c) Yanal eğilme teorilerine göre kiriş en kesitindeki kayma gerilmelerinin dağılımı (The distribution of shear stress at the cross section according to the a) elastic b) plastic c)skew-bending theory) [3]

Betonarme kirişlerde çatlağa sebep olana ilk kuvvete kritik kuvvet ve kuvvete karşılık gelen burulma momentine de kritik burulma momentini ( $T_{cr}$ ) denir. Kritik burulma momentini değerini hesaplamak için araştırmacılar kendi çalışmalarından yola çıkarak bir takım ampirik formüller üretmişlerdir. Ayrıca Türk Standardı TS500-2000 [4]' de kritik burulma momentini değeri için formül önerilmiştir. Türk Standardındaki kritik burulma momentini Denklem 5' de verilmiştir.

$$T_{cr(TS)} = 1.35f_{ctd}S \quad (5)$$

Burada,  $f_{ctd}$  betonun tasarım çekme dayanımını,  $S$  burulma dayanım momentidir.

Hsu [5] kendi çalışmalarını baz alarak kritik burulma momentini için önermiş olduğu formül Denklem 6'da verilmiştir.

$$T_{cr(Hsu)} = \frac{1.015}{\sqrt{b}} b^2 h \sqrt{f_c} + \left(0.66m \frac{f_{yd}}{f_{ywd}} 0.33 \frac{h_j}{b_j}\right) \frac{A_{sw} f_{ywd} h_j b_j}{s} \quad (6)$$

$$m = \frac{A_s s}{2(h_j + b_j) A_{sw}} \quad (7)$$

Burada,  $b$  kiriş en kesitinin kısa kenarını,  $h$  kiriş en kesitinin uzun kenarını,  $f_c$  betonun tasarım basınç dayanımını,  $f_{yd}$  boyuna donatı çeliğinin akma dayanımını,  $f_{ywd}$  etriye çeliği akma dayanımını,  $b_j$  ve  $h_j$  sırasıyla etriye kolunun yatay ve dikey uzunluğunu,  $A_{sw}$  etriye kesit alanını,  $s$  etriye aralığını göstermektedir.  $A_s$  kirişteki bütün boyuna donatıların alanıdır.

Kuty [6] kritik burulma momentinin etriye ve boyuna donatıya göre iki şekilde hesaplanması

gerektiğini belirtmiştir ve Denklem 8 ve 9'daki formülleri önermiştir.

Etriye için,

$$T_{cr(Kuty)} = A_{sw} f_{ywd} \frac{2A_c}{s} \cot\theta \quad (8)$$

Boyuna donatı için,

$$T_{cr(Kuty)}^l = 2b_j h_j \sqrt{\frac{A_{sl} f_{yd}}{2(h_j + b_j)}} \frac{A_{sw} f_{ywd}}{s} \quad (9)$$

Burada,  $A_c$  betonun kesit alanını,  $A_{sl}$  boyuna donatı kesit alanını ifade etmektedir.

Thurliman [7] da kritik burulma momentini değerini hesaplarken etriye ve boyuna donatı olmak üzere iki şekilde ele almıştır ve Denklem 10 ve 11'deki formülü önermiştir.

Etriye için,

$$T_{cr(Thur)} = \frac{2A_k A_{sw} f_{ywd}}{s} \cot\theta \quad (10)$$

Boyuna donatı için,

$$T_{cr(Thur)}^l = \frac{2A_k A_{sl} f_{yd}}{u_k} \tan\theta \quad (11)$$

Burada,  $A_k$  merkezi boyuna donatıların ortası olan kesit alanını,  $u_k$   $A_k$ 'nin çevresidir.

Bu ampirik bağıntıların dışında kritik burulma momentini ile ilgili bir diğer formül ise ince cidarlı tüp benzeşimi teorisidir[8]. Bu teoriye göre kritik burulma momentini formül Denklem 12'de verilmiştir.

$$T_{cr(Thin-Walled)} = [1 + (n - 1)\rho] \left(\frac{A_c^2}{u_c}\right) f_{cr} \quad (12)$$

Burada,  $\rho$  donatı oranını,  $u_c$  beton kesit alanının çevresini,  $f_{cr}$  betonun çatlama dayanımıdır.

## 2.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton (Self-compacting Concrete)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB) 1986 yılında Tokyo Üniversitesinde Prof. Okamura ve ekibi tarafından bulunmuştur[9]. KYB, özel bir karışım hesabı ve dizaynı bulunan, slump kavramı yerine yayılma kavramı ile değerlendirilen ve yerine kendiliğinden yerleşen, bu amaçla vibratör kullanılmamasına gerek olmayan, kolay

pompalanabilen, su/çimento oranı düşük, yüksek dayanımlı, segregasyon olmayan, kendiliğinden sıkışan ve seviyelenebilen, kolaylıkla döküldüğü kalıbın şeklini alan yüksek dayanımlı özel bir beton türüdür[9-13]. Tüm bu avantajlarından dolayı KYB beton endüstrisinde giderek kabul görmüştür ve kullanımı her geçen gün artmaktadır[14]. Öyle ki günümüzün yaygın olarak bilinen Dubai'deki Burj Khalifa, İspanya'daki Dragon Köprüsü, İtalya'daki 21. Yüzyıl Sanat Merkezi Binası'nın yapımında KYB kullanılmıştır[15].

KYB'nin basınç dayanımı, geleneksel betonda olduğu gibi tanımlayıcı en önemli özellik olmakla beraber tespiti geleneksel betonla aynıdır. KYB'nin çekme dayanımı geleneksel betonda olduğu gibi düşük olduğu, dayanım kazanma hızının kullanılan süperakışkanlaştırıcının türüne göre azalır veya artacağı, sünmenin geleneksel betona oranla daha olumlu davranışlar gösterdiği rapor edilmiştir [16].

Gerek ulusal gerek uluslararası standartlarda fazla yer verilmeyen burulma momentinin betonarme kiriş elemanlardaki etkisi bu çalışma kapsamında amaçlanmıştır.

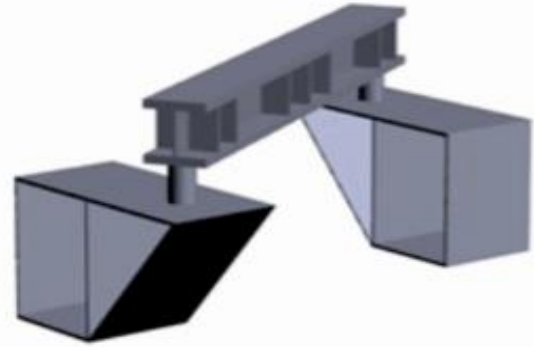
### 3. MATERYAL METOT (MATERIAL AND METHOD)

Betonarme kirişlerde burulma davranışının incelendiği bu çalışmada 20 adet 250x300x1500 mm ebatlarında kiriş numunesi hazırlandı. Normal betonlu kirişlerde her bir kiriş numunesinden 3 adet, KYB'li kiriş numunelerinden ise 2 adet döküldü. Daha sağlıklı sonuçların elde edilip yorumlanabilmesi için bu değerlerin ortalaması alındı. Kiriş numunelerinin 12 tanesi normal betonla 8 tanesi de KYB ile üretildi. Çalışmanın ana parametreleri beton sınıfı, beton tipi ve etriye oranı olarak belirlendi. Beton sınıfı normal beton ve KYB, beton sınıfı olarak 20 MPa ve 40 MPa, etriye aralığı olarak da 80 mm ve 100 mm seçildi. Kirişlerin donatılabilmesi yapılırken ikisi kiriş en kesitinde yukarıda ikisi de aşağıda olmak üzere dört adet 16 mm çaplı nervürlü inşaat demiri boyuna donatı olarak, 8 mm çaplı nervürlü inşaat demiri etriye olarak kullanıldı. Kirişlerde pas payı 30 mm bırakıldı.

Kiriş numunelerinin beton döküm işlemleri ilgili standartlara uygun bir şekilde laboratuvar ortamında yapıldı. KYB deneyleri yapılırken EFNARC [17]'ye uygunluğu göz önünde bulundurulmuştur. Beton dökümü bitirilen kirişler

28 gün boyunca su küresine tabi tutuldu ve bu sürenin sonunda burulma momenti uygulandı. Beton dökümünde CEM I 42.5R Portland çimentosu kullanıldı. Karışımda hazır beton santralinden temin edilen 0-5 mm ince agrega ve 5-15 mm iri agrega kullanıldı. KYB üretiminde mineral katkı olarak silis dumanı, süperakışkanlaştırıcı olarak da Draco marka akışkanlaştırıcı kullanıldı. Karışım suyu olarak da içme suyu şebekesinden temin edilen su kullanıldı.

Deneysel yük altında eğimleri ve deformasyonları ölçmek için üç adet Linear Variable Differential Transformer (LVDT) numunenin sağ tarafına, üç adet ise numunenin sol tarafına bağlandı. Kiriş numunelerinde burulma momenti oluşturmak için kirişlerin sağ ve sol baş kısımlarında 300 mm derinliğinde içi boş kutu şeklinde iki adet çelik levhadan yapılmış kelepçe hazırlandı. Kirişler deney esnasında bu kelepçelerin içine oturtulmuştur. Bu çelik levhaların üzerine ise çapraz şekilde 1460 mm uzunluğunda ve yedi adet berkitmesi bulunan HEB160 çelik profil konuldu. Bu profilin tam orta noktasına düşey şekilde yük uygulandı. Deney düzeneğinin şematik çizimi Şekil 2' de gösterilmektedir.



Şekil 2. Deney düzeneği (Test setup)

Kiriş numunelerinden elde edilen değerlerin daha kolay bir şekilde yorumlanabilmesi için kirişlere isimlendirme yapılmıştır. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi ve detayları Tablo 1' de verilmiştir.

### 4. BULGULAR (RESULTS)

Burulma momentine maruz bırakılan kiriş numunelerinin burulma momenti kapasiteleri ( $T_u$ ) ve bu değere karşılık gelen dönme açısı  $\theta_u$  ile kirişlerde burulmadan dolayı oluşan ilk çatlağa

neden olan kritik burulma momenti değeri ( $T_{cr}$ ) ve bu değere karşılık gelen dönme açısı ( $\theta_{cr}$ ) deneysel olarak ölçülmüştür. Deneysel olarak elde edilen burulma momenti kapasitesi değerlerinin, elastik, plastik ve yanal eğilme teorisine göre hesaplanan teorik değerlerle karşılaştırılması yapıldı. Kritik burulma momenti değerlerinin de ilgili çalışmalardan elde edilen ampirik bağıntılarla karşılaştırılması yapıldı. KYB beton dökümü işlemi sırasında betonun akıcılığını, viskozitesini ve geçme kabiliyetini ölçmek için yapılan deneylerin sonuçları Tablo 2’ de verilmiştir.

Tablo 1. Kiriş numunelerinin isimlendirilmesi (Naming of beam samples)

Kiriş Adı	Beton Sınıfı MPa	Beton Tipi	Etriye Aralığı mm
N20E80	20	Normal Beton	80
N20E100	20	Normal Beton	100
N40E80	40	Normal Beton	80
N40E100	40	Normal Beton	100
K20E80	20	KYB	80
K20E100	20	KYB	100
K40E80	40	KYB	80
K40E100	40	KYB	100

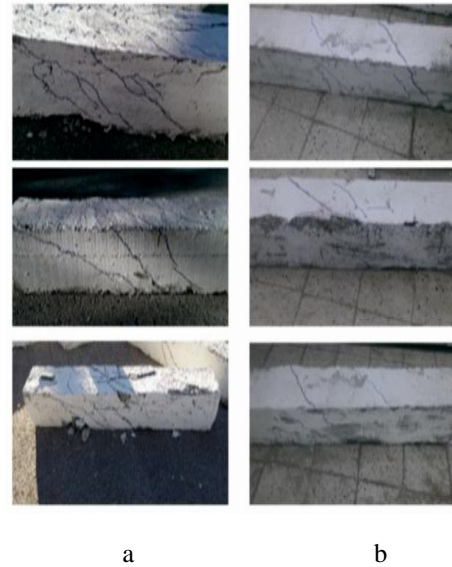
Tablo 2. KYB deney sonuçları (SCC test results)

Beton Sınıfı	Yayımla Deneyi D (mm)	L-Kutusu Deneyi	V-Hunisi Deneyi (s)
C20	640	0.11	9.8
C40	640	0.14	8.6

Burulma momentine maruz bırakılan kiriş numunelerinin deney sonrasındaki görüntüleri Şekil 3’ de gösterilmektedir. Şekil 3a’ da normal beton serilerindeki çatlaklar Şekil 3b’ de ise KYB serilerindeki çatlaklar görülmektedir. Kiriş numunelerinde çatlakların ani bir şekilde meydana geldiği deney esnasında gözlemlenmiştir. Artan burulma momenti etkisindeki kirişte meydana gelen ilk çatlak ikinci, üçüncü ve hatta bazı numunelerde dördüncü çatlak takip etmiştir. İlk çatlakta oluşan çatlak genişliğine diğer çatlaklar ulaşamamışlardır. Şekil 3’ den de anlaşılacağı üzere normal beton serilerinde meydana gelen çatlaklar KYB serilerindekilere göre daha fazladır. Normal beton serilerinde meydana gelen çatlak dallanmaları daha fazladır. Ayrıca normal betonlu kirişlerde ki çatlak genişlikleri KYB’ li betonlara göre daha fazladır.

Tablo 3’ de deneysel olarak ölçülen  $T_u$  ve  $\theta_u$  değerlerinin teorik değerlerle karşılaştırılması

yapılmıştır. Betonun davranışı ne tam elastik ne de tam plastik olmadığından, elastik teori burulma kapasitesinin altında plastik teori ise burulma kapasitesinin üzerinde sonuçlar vermiştir. Gerçeğe en yakın değerler ise yanal eğilme teorisinde elde edilmiştir. Tablo 3’deki değerler, etriye adım mesafesi ile burulma momenti kapasitesinin ( $T_u$ ) orantılı olduğunu göstermektedir. Etriye adım mesafesi daha az olan kiriş numuneleri daha büyük değerlerde kırılmıştır. Etriye adım mesafesi az olan numunelerin daha fazla burulma momenti karşılamalarının sebebi etriye aralığı az olan numunelerde etriyeler boyuna donatılara daha iyi bir şekilde sargı görevi görmüşlerdir. Dolayısıyla beton numune üzerine gelen kesme kuvvetlerini daha iyi karşılamıştır. Burulma momentinin de kesme kuvvetinden kaynaklandığını düşünürsek etriye aralığı az olan numunelerin daha yüksek burulma momenti değerlerine çıkması normaldir. Ayrıca etriye aralığının az olması numunelerde daha fazla plastik şekil değiştirme özelliği kazandırmıştır ve dolayısıyla elemanların sünekliğini artırmıştır. Tablo 3’de görüldüğü gibi beton basınç dayanımı yüksek olan grupta daha büyük burulma momenti değerleri kaydedilmiştir. Buda betonun basınç dayanımı ile ilgilidir. Yani daha fazla basınç dayanımına sahip olan numuneler daha büyük kesme kuvveti ve dolayısıyla daha büyük burulma momenti değerleri karşılarlar. Ayrıca KYB’ li beton numunelerinin normal betonlu numunelere göre daha yüksek değerlerde burulma momenti karşıladıkları deneysel olarak tespit edilmiştir.



Şekil 3. a) Normal beton b)KYB serileri burulma çatlakları (The torsional cracks of a) Conventional concrete b)SCC series)

Tablo 3. Deneysel ve teorik burulma momentleri sonuçları  
(The torsional moement results of experimental and theoretical)

Kiriş Adı	Tu	Ort Tu	$\theta_u$ (deg/m)	T <sub>E</sub>	T <sub>P</sub>	T <sub>Y</sub>
	(kNm)			(kNm)		
N20E80-1	11.2	11.7	3.13	6.51	10.8	12.5
N20E80-2	11.3		2.77	6.51	10.8	12.5
N20E80-3	12.6		4.27	6.51	10.8	12.5
N20E100-1	11.9	11.4	3.31	6.51	10.8	12.5
N20E100-2	10.6		3.24	6.51	10.8	12.5
N20E100-3	11.9		3.84	6.51	10.8	12.5
N40E80-1	12.1	14.0	3.64	8.95	14.8	17.2
N40E80-2	16.1		2.91	8.95	14.8	17.2
N40E80-3	13.9		3.69	8.95	14.8	17.2
N40E100-1	14.2	13.3	3.19	8.95	14.8	17.2
N40E100-2	15.2		4.58	8.95	14.8	17.2
N40E100-3	10.7		3.43	8.95	14.8	17.2
K20E80-1	17.9	16.1	5.71	6.51	10.8	12.5
K20E80-2	14.4		3.82	6.51	10.8	12.5
K20E100-1	13.2		13.8	1.8	6.51	10.8
K20E100-2	14.5	4.5		6.51	10.8	12.5
K40E80-1	20.0	20.3	5.05	8.95	14.8	17.2
K40E80-2	20.6		3.32	8.95	14.8	17.2
K40E100-1	18.1	18.5	5.09	8.95	14.8	17.2
K40E100-2	18.9		4.95	8.95	14.8	17.2

Deneysel olarak elde edilen  $T_{cr}$  ve  $\theta_{cr}$  değerlerinin ilgili ampirik bağıntılarla karşılaştırılması Tablo 4 ve 5’ de yapılmıştır. Tablo 4 ve 5’ i incelediğimiz zaman deneysel sonuçlara en yakın değerler Hsu’ nun önermiş olduğu formülde elde edilmiştir. Ayrıca kritik burulma momentleri değerinin boyuna donatı kullanılarak elde edilen teorik değerlerle deneysel değerleri karşılaştırdığımız zaman burulma momentinin kiriş kesiti ile ilgili olduğunu görmekteyiz. Tablo 3 ve Tablo 4’ deki  $T_u$  ve  $T_{cr}$  değerlerine baktığımız zaman bu değerlerin bir birleri ile oldukça yakın olduklarını görmekteyiz. Yani kirişte ilk burulma çatlağı meydana geldikten sonra kiriş çok az miktarda burulma momentleri karşılamaktadır.

Normal betonlu ve KYB’ li kiriş numunelerinin burulma momentleri kapasitesi-dönme açısı arasındaki ilişki Şekil 4’ deki grafiklerde

görülmektedir. Grafikleri incelediğimiz zaman artan burulma momentleri altında dönme açısı ilk başlarda lineer bir şekilde artmıştır. Daha sonra eğri lineerliğini kaybetmiştir ve nonlineer bir şekil almıştır. Burulma momentine maruz bırakılan bir kirişte mukavemetin yanı sıra aranan bir diğer özellikte düktil davranıştır. Düktil davranıştan kasıt, burulma çatlaması oluştuğundan sonra kirişin gevrek bir şekilde kırılmaması, taşınan burulma momentinde bir azalma olmadan deformasyonların artabilmesidir. Yapılan deneyler düktil davranışın kayma donatısının bir fonksiyonu olduğunu kanıtlamıştır. Burulma momentleri kapasitesi-dönme açısı grafiklerine baktığımız zaman grafiklerin altında kalan alan bize düktil davranış hakkında bilgi vermektedir.

Burulma momentleri dönme açısı grafiklerinde grafiğin altında kalan alan ne kadar büyük ise düktil davranışta o kadar iyidir diyebiliriz. Yani grafiğin altında kalan alanın büyük olması o numunede burulma çatlakları meydana geldikten sonra kırılmanın sünek bir şekilde gerçekleştiğini gösterir. Bu da bize betonarme elemanlarda istediğimiz kırılma şeklinin gerçekleştiğini gösterir. Deney grafiklerine baktığımız zaman normal beton serilerinde N40E80 serisinin, KYB serilerinde ise K40E80 serisinin burulma momentleri dönme açısı grafiklerinin altında kalan alanların daha fazla olduğunu görmekteyiz. Yani bu seriye ait numunelerde meydana gelen kırılma diğer numunelere göre daha sünek bir şekilde gerçekleşmiştir. Deneylerden elde edilen grafiklerden yola çıkarsak beton sınıfını yüksek tutmanın ve etriye aralığını ise düşük tutmanın düktil davranış üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu yani bir deprem anında burulma etkisine maruz, betonarme bir kirişin taşıma kapasitesine daha geç ulaşmasını sağlayacağını söyleyebiliriz.

Tablo 4. Kritik burulma momentleri değerleri (Critical torsional moment results)

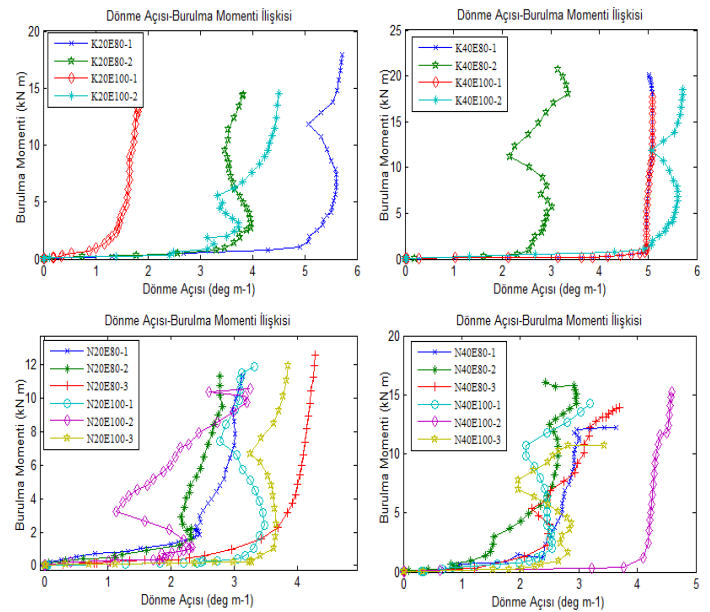
Kiriş Adı	T <sub>cr</sub> kNm	$\theta_{cr}$ deg/m	T <sub>cr</sub> (TS) kNm	T <sub>cr</sub> (Hsu) kNm
N20E80-1	10.72	3.09	8.77	12.51
N20E80-2	10.2	2.56	8.77	12.51
N20E80-3	11.24	4.24	8.77	12.51
N20E100-1	9.31	3.01	8.77	11.08
N20E100-2	9.19	2.98	8.77	11.08
N20E100-3	9.28	3.70	8.77	11.08
N40E80-1	12.10	3.43	12.49	14.74

N40E80-2	15.75	2.43	12.49	14.74
N40E80-3	13.8	3.69	12.49	14.74
N40E100-1	12.67	2.80	12.49	13.32
N40E100-2	13.32	4.55	12.49	13.32
N40E100-3	1.70	3.40	12.49	13.32
K20E80-1	16.58	5.68	8.77	12.51
K20E80-2	13.41	3.74	8.77	12.51
K20E100-1	11.85	1.75	8.77	11.08
K20E100-2	12.43	4.45	8.77	11.08
K40E80-1	19.52	5.02	12.49	14.74
K40E80-2	19.03	3.15	12.49	14.74
K40E100-1	16.53	5.08	12.49	13.32
K40E100-2	15.5	4.91	12.49	13.32

Tablo 5. Ampirik kritik burulma momenti değerleri (The empirical torsional moment results)

Kiriş Adı	T <sub>cr</sub> (Kuyt) (Etriye)	T <sub>cr</sub> (Kuyt) (Boy. Donatı)	T <sub>cr</sub> (Thur) (Etriye)	T <sub>cr</sub> (Thur) (Boy. Donatı)	T <sub>cr</sub> (Thin-Walled)
N20E80-1	18	1.18	10.95	4.1	8.16
N20E80-2	18	1.18	10.95	4.1	8.16
N20E80-3	18	1.18	10.95	4.1	8.16
N20E100-1	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
N20E100-2	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
N20E100-3	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
N40E80-1	18	1.18	10.95	4.1	11.12
N40E80-2	18	1.18	10.95	4.1	11.12
N40E80-3	18	1.18	10.95	4.1	11.12
N40E100-1	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12
N40E100-2	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12
N40E100-3	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12
K20E80-1	18	1.18	10.95	4.1	8.16
K20E80-2	18	1.18	10.95	4.1	8.16
K20E100-1	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
K20E100-2	14.4	1.05	8.76	4.1	8.16
K40E80-1	18	1.18	10.95	4.1	11.12
K40E80-2	18	1.18	10.95	4.1	11.12
K40E100-1	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12
K40E100-2	14.4	1.05	8.76	4.1	11.12

Tablodaki değerler kNm cinsindedir.



Şekil 3. Burulma momenti-dönme açısı grafikleri (The torsional moment-rotation angles graphic)

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND RESULTS)

Beton sınıfı olarak daha yüksek dayanıma sahip olan kiriş numunelerinin burulma momenti kapasitelerinin daha yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu bağlamda N40 serisinin N20 serisine göre, K40 serisinin de K20 serisine oranla daha yüksek burulma momenti kapasitesine ulaştıkları deneysel olarak belirlenmiştir. KYB serilerinin normal beton serilerine göre yaklaşık % 40 daha fazla burulma momenti kapasitesine sahip oldukları deneysel olarak tespit edilmiştir. Etriye aralığını azaltmak burulma momenti kapasitesini N20 serisinde % 2, N40 serisinde % 5, K20 serisinde % 17, K40 serisinde % 9 oranında arttırdığı tespit edilmiştir.

Deney numunelerindeki kritik burulma momenti değerleri karşılaştırıldığı zaman KYB serilerinin normal beton serilerine göre % 35 daha fazla burulma momenti değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde beton sınıfını arttırmak kritik burulma momenti değerini % 30 arttırmıştır. Etriye aralığını azaltmak kritik burulma momenti değerini normal beton serilerinde % 15, KYB serilerinde % 20 oranında artmasına sebep olmuştur. Ampirik bağıntılar arasında kritik burulma momenti değerlerine en yakın sonuçlar Hsu'nun önermiş olduğu formülde elde edilmiştir. Deneysel T<sub>cr</sub> değerleri Hsu'nun ampirik bağıntısının sonuçlarından yaklaşık % 2 daha fazla





çıkmiştir. Ayrıca deneysel  $T_{cr}$  sonuçları,  $T_{cr}(TS)$  değerlerinden % 23,  $T_{cr}(\text{Thin-Walled})$  değerlerinden yaklaşık % 36,  $T_{cr}(\text{Thur})$  değerlerinden yaklaşık % 36 daha fazla,  $T_{cr}(\text{Hsu})$  değerlerinden % 18 daha az çıkmıştır.

Deneysel  $T_u$  değerlerine teoriler arasında en yakın sonuçlar yanal eğilme teorisinde elde edilmiştir. Yanal eğilme teorisi değerleri deneysel  $T_u$  değerlerinden yaklaşık % 2 daha fazla çıkmıştır. Deneysel  $T_u$  değerleri elastik teori değerlerinden % 87, plastik teori değerlerinden yaklaşık % 12 daha fazla çıkmıştır.

### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Doğangün, A., Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı 2008, İstanbul Birsen Yayınevi
- [2] Csikós, Á. and I. Hegedűs, Torsion of reinforced concrete beams. Technical University of Budapest, Department of Reinforced Concrete Structures H-1521 Budapest, 1998.
- [3] Zhang, Y., Torsion in high strength concrete rectangular beams 2002.
- [4] TS500, TS500 Requirements for design and construction of reinforced concrete structures, 2000, Turkish Standards Institute Ankara,, Turkey.
- [5] Hsu, T.T., Torsion of Structural Concrete-Plain Concrete Rectangular Sections. Special Publication, 1968. **18**: p. 203-238.
- [6] Kuyt, B., Ultimate Torsional Resistance Of Rectangular Reinforced Concrete Beams. Concrete, 1968. **2**(12): p. 522-&.
- [7] Lampert, P. and B. Thürlimann, Torsionsversuche an Stahlbetonbalken. 1968.
- [8] Valipour, H.R. and S.J. Foster, Nonlinear reinforced concrete frame element with torsion. *Engineering Structures*, 2010. **32**(4): p. 988-1002.
- [9] Pineaud, A., et al., Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature. *Construction and Building Materials*, 2016. **112**: p. 747-755.
- [10] Gesoğlu, M., et al., Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash. *Construction and Building Materials*, 2012. **37**: p. 160-170.
- [11] Naik, M.P.P. and M. Vyawahare. Strength And Durability Investigations On Self Consolidated Concrete With Pozzolanic Filler And Inert Filler. in International Journal of Engineering Research and Technology. 2013. ESRSA Publications.
- [12] Aydın, A.C., et al., Effects of the different atmospheric steam curing processes on the properties of self-compacting-concrete containing microsilica. *Sadhana*, 2015. **40**(4): p. 1361-1371.
- [13] Sadek, D.M., M.M. El-Attar, and H.A. Ali, Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 2016. **121**: p. 19-32.
- [14] Golafshani, E.M. and A. Ashour, Prediction of self-compacting concrete elastic modulus using two symbolic regression techniques. *Automation in Construction*, 2016. **64**: p. 7-19.
- [15] Okrajnov-Bajić, R. and D. Vasović, Self-compacting concrete and its application in contemporary architectural practice. *Spatium*, 2009(20): p. 28-34.
- [16] Poppe, A.-M. and G. De Schutter. Creep and shrinkage of self-compacting concrete. in First International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete, China. 2005.
- [17] EFNARC, S., Guidelines for self-compacting concrete. EFNARC Publication, London, UK, 2002: p. 1-32.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 28.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 08.05.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.301609	

## Arıtma çamurlarının su verme özelliklerinin iyileştirilmesinde biyokütle ve kömür külü ilavesinin etkilerinin incelenmesi

Ömer Hulusi Dede<sup>\*1</sup>, Derya Akbulut<sup>1</sup>

### ÖZ

Arıtma çamurlarının içerdiği su miktarının düşürülmesi, bertaraf edilecek çamur miktarının azaltılması ve bertaraf seçeneklerinin artması bakımından en belirleyici unsurdur. Mevcut durumda çamur susuzlaştırmada en çok kullanılan yöntemler mekanik yöntemlerdir. Ancak mekanik yöntemlerin veriminin artırılması için, çamura polielektrolit ilave edilerek şartlandırma işlemi yapılması ve çamurun su verme özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada çamur şartlandırma işleminde ki polielektrolit kullanımına alternatif olarak biyokütle ve kömür külü kullanımının, arıtma çamurunun su verme özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla biyokütle ve kömür külü değişik oranlarda arıtma çamurları ile karıştırılmıştır. Kontrol uygulaması olarak da 1/1000' lik katyonik polielektrolit çözeltisi kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar göre karışımlardaki kül oranı arttıkça, su verme özelliklerinin en önemli göstergeleri olan, özgül filtre direnci (ÖFD) ve filtre keki nem miktarları (FK) önemli ölçüde azalmıştır. Kontrol olarak kullanılan polielektrolit uygulamasına (ÖFD:  $2,8 \cdot 10^{11}$  m.kg<sup>-1</sup>, FK: % 58,96) en yakın sonuçlar, en yüksek oranda biyokütle külü kullanılan BÇ<sub>6</sub> uygulamasında (ÖFD:  $29 \cdot 10^{11}$  m.kg<sup>-1</sup>, FK: % 65,92) elde edilmiştir. Bununla birlikte biyokütle ve kömür külü uygulamalarının sonuçları istatistiksel olarak önemli ölçüde benzer bulunmuştur ( $R^2=0,99$ ). Biyokütle ve kömür külü ağır metal içeriğinde ise, Zn dışındaki tüm değerlerde, biyokütle külünün ağır metal oranlarının daha düşük olduğu görülmüştür. Bu sonuçlara göre, biyokütle ve kömür küllerinin evsel atık su arıtma çamurlarının su verme özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılabileceği, ancak çamurun ağır metal düzeyi göz önünde bulundurularak, susuzlaştırmadan sonraki bertaraf alternatiflerinin artırılması için biyokütle külü kullanımının en iyi alternatif olduğu söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** arıtma çamurlarının susuzlaştırılması, biyokütle külü, kömür külü

## Analyzing the effects of biomass and coal ash for the dewatering properties of sewage sludge

<sup>1</sup> Yazar 1 Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü [ohdede@sakarya.edu.tr](mailto:ohdede@sakarya.edu.tr)

<sup>1</sup> Yazar 2 Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü [coşan\\_derya@hotmail.com](mailto:coşan_derya@hotmail.com)

## ABSTRACT

Diminishing the amount of water in sewage sludges is the most determinant factor in terms of increasing the options of removing and being reduced the number of sludges to remove. In the current situation, the most preferred methods are the mechanic methods for sludge dewatering. But, the quenching features of the sludge must be improved and the conditioning procedures need to be actualized by adding polyelectrolyte into the sludge to enhance the productivity of the mechanical methods. As an alternative to the use of polyelectrolyte in sludge conditioning procedure, the effects of the use of biomass and coal ash on the quenching features are analyzed in this research. For this purpose, the biomass and the coal ash were mixed with the sewage sludges in different ratios. The 1/1000 cationic polyelectrolyte solution was used as the control application. According to the results obtained from the study, as the ash content in the mixtures increases, the specific resistance to filtration (SRF) and the filter cake moisture content (FCM), which are the most important indicators of water quenching properties, have been significantly reduced. The closest results to the polyelectrolyte application (SRF 2,8.1011 m.kg-1, FCM: % 58,96) used as the control were obtained from the BC6 application (SRF: 29.1011 m.kg-1, FCM: % 65,92) where the highest ratio of biomass ash used. Moreover, the results of the implementations of biomass and coal ash are determined as statistically similar ( $R^2=0,99$ ). In the content of biomass and coal ash heavy metals, it is seen that the ratios of heavy metal of biomass ash are lower for all values other than Zn. It is thought according to these results that the biomass and coal ash can be used to improve the dewatering features of domestic waste water treatment sludges. However, considering the heavy metal level of the sludge, it can be said that the best alternative is the use of biomass ash for increasing the disposal options after dewatering.

**Keywords:** dewatering of the sewage sludges, biomass ash, coal ash

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüz şartlarında evsel ve endüstriyel su kullanımı yüksek boyutlara ulaşmıştır. Bu durum kullanılmış suların arıtılarak doğal çevre ve insan sağlığına zarar vermeden bertarafını zorunlu kılmaktadır. Bundan dolayıdır ki dünya genelinde her yıl değişik boyutlarda ve farklı arıtma teknolojileri kullanan birçok arıtma tesisi kurulmakta ve işletilmektedir. Ancak atık suların bu tesislerde arıtılarak tekrar kullanılması veya uygun alıcı ortama deşarjı prosesi sonlandırmamaktadır. Çevresel riskleri tam olarak ortadan kaldırmak için arıtma işlemi sırasında ortaya çıkan atık su arıtma çamurlarının da uygun bertarafının yapılması gerekmektedir[1]. Ancak bu işlem atık suyun içindeki kirleticileri sudan uzaklaştırmak kadar zahmetli olup, toplam arıtma maliyetinin yarısını oluşturmaktadır[2]. Literatürde konu ile ilgili yapılmış çalışmaların ortak görüşü olarak, çamur bertaraf maliyetinin düşürülmesi ve bertaraf işlemlerinin kolaylaştırılarak, işlem seçeneklerinin artırılabilmesinin en pratik yolu, arıtma çamuru miktarının kaynağında azaltılmasıdır[3]. Bertaraf edilmesi gereken çamur miktarının azaltılması ise ancak çamurun içerisinde bulunan yüksek orandaki suyun azaltılması ile

mümkün olabilir. Bununla birlikte yaklaşık % 95 oranında su içeren çamurun susuzlaştırılması, çamurdaki suyun dağılımı, hücre dışı polimerik maddelerin miktar ve dağılımı ve çamurun partikül boyutu gibi parametreler ile doğrudan ilişkili ve son derece karmaşık bir prosestir[4,5,6]. Çamur susuzlaştırma işlemi için geliştirilen bir çok yöntem bulunmasına rağmen, bu işlem için en çok tercih edilen yöntemler mekanik su alma sistemleridir. Mekanik susuzlaştırma sistemlerinin arıtma tesisinde küçük bir alan gerektirmesi ve zamandan tasarruf sağlamaları tercih edilmelerinin ana sebepleridir. Ancak çamur bu sistemlerde işleme girmeden önce kimyasal olarak şartlandırılması gerekir. Kimyasal şartlandırma işlemi, çamura kalsiyum oksit, demir klorid vb. kimyasalların eklenerek, mekanik güç uygulandığında su verme özelliklerinin artırılmasıdır[7]. Kimyasal çamur şartlandırıcılar susuzlaştırma işleminin en önemli maliyet kalemlerinden birini oluşturmakta bundan dolayı bu kimyasalların yerine daha ucuz alternatifler üretmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır[8, 9, 10]. Bu çalışmalar arasında, kömürle çalışan termik santrallerin, uçucu küllerinin, kimyasal şartlandırıcılara alternatif olarak kullanılabileceğini ortaya koyan araştırmalar bulunmaktadır[11]. Ancak, kömür küllerinin arıtma çamuruna karıştırılması su verme özelliklerini olumlu etkilerken, çamurun organik

madde miktarını düşürürken, ağır metal içeriğini artırmaktadır. Bu durum suyu alınmış çamurun bertaraf alternatiflerini azaltmaktadır. Bununla birlikte dünya genelinde kömür yerine, ağaç dalları, talaş, enerji bitkileri gibi bitkisel kökenli biyokütlelerin kullanımı, daha düşük sıcaklıklarda çalışılması, ortaya çıkan zararlı emisyonların düşüklüğü ve küllerinin daha az miktarda ve daha zararsız kül üretmesi nedeniyle hızla artmaktadır [12, 13]. Bu çalışmada evsel arıtma çamurlarının su verme özelliklerinin iyileştirilmesinde, biyokütle külünün kullanılabilirliği araştırılmış ve su verme özelliklerinin iyileştirilmesindeki elde edilen sonuçlar, kömür külleri kullanımının sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Çalışmada kullanılan arıtma çamurları Sakarya İli'nde bulunan Karaman evsel atık su arıtma tesisinden temin edilmiştir. Bu tesiste evsel atık suların arıtılmasında, uzun havalandırma aktif çamur sistemi kullanılmaktadır. Numuneler yoğunlaştırıcı ile şartlandırma ünitesi arasından ve polielektrolit çözültisi dozlama işlemi yapılmadan alınmış ve alınan numuneler hızlıca laboratuvara ulaştırılarak 4 °C' de analiz zamanına kadar saklanmıştır. Kullanılan küller, yakıt olarak yalnızca kömür ve yalnızca tarımsal kökenli bitki ve orman atıkları kullanan iki farklı santralin yakma ünitesinden alınmıştır. Kömür külünün partikül boyut dağılımı 100-200 µm = %12, 50-100 µm = %42, 2-50 µm = %44, <2µm =2, biyokütle külünün partikül boyut dağılımı ise 100-200 µm = %5, 50-100 µm = %26, 2-50 µm = %75, <2µm =%4 şeklindedir. Arıtma çamuru ve küllerin karıştırma işleminde çamur kuru madde miktarı dikkate alınmıştır. 500 ml çamura kuru madde miktarına göre (19,65 g l<sup>-1</sup>) ağırlıkça değişen oranlarda kül ilave edilmiş ve önce 250 rpm de 30 saniye hızlı karıştırma, ardından da 30 rpm de 2 dakika yavaş karıştırma yapılmıştır. Karışımda kullanılan küllerin ağırlıkları ve karışımlara verilen kodlar (BÇ : Biyokütle külü ve arıtma çamuru karışımı, KÇ : Kömür külü ve arıtma çamuru karışımı) Tablo 1' de sunulmuştur. Biyokütle ve kömür külünün arıtma çamurunun su verme özelliklerini iyileştirmedeki başarısını belirlemek için kontrol amacı ile 1/1000' lik katyonik polielektrolit çözültisi hazırlanmış ve hazırlanan çözülti 500 ml çamura 14 ml olacak şekilde ilave edilmiş ve küllerde uygulanan

karıştırma yöntemi kullanılarak arıtma çamuru ile karıştırılmıştır.

Tablo 1. Karışımlarda kullanılan kül ve arıtma çamuru miktarları (Amounts of ash and sewage sludge used in mixtures)

Karışım Kodları	Kül Oranı	Kül Miktarı (gr)	Çamur Miktarı (ml)
BÇ <sub>1</sub> KÇ <sub>1</sub>	% 25	4,912	500
BÇ <sub>2</sub> KÇ <sub>2</sub>	% 50	9,825	500
BÇ <sub>3</sub> KÇ <sub>3</sub>	% 75	14,737	500
BÇ <sub>4</sub> KÇ <sub>4</sub>	% 100	19,650	500
BÇ <sub>5</sub> KÇ <sub>5</sub>	% 150	29,475	500
BÇ <sub>6</sub> KÇ <sub>6</sub>	% 200	39,300	500

Hazırlanan kül ve çamur karışımı numunelerinin kuru madde oranları, numunelerin sabit tartıma gelene kadar kurutulduktan sonra (105 °C' de) tartılması ile bulunmuştur. Nem içerikleri ise kurutulmuş numunelerin toplam ağırlığında meydana gelen kayıpla belirlenmiştir [10]. Numunelerin (105 °C de kurutulmuş) organik madde içeriği ise, 550 °C' de 4 saat süre ile yakılması ilkesine göre belirlenmiştir [14]. Ağır metal seviyeleri yaş yakma yöntemi ile hazırlanan örneklerde ICP-OES cihazı kullanılarak saptanmıştır [15]. Hazırlanan numuneler 2000 rpm de 5 dakika santrifüj edilmiş ve elde edilen süpernatantta pH ölçümü yapılmıştır [10, 16]. Arıtma çamuru ve kül karışımlarının özgül filtre direnci, numunelerin Buchner hunisine koyularak, filtre kâğıdı ile vakum (0,03 MPa) filtrasyon setinde süzülmesi ile formül (1) kullanılarak bulunmuştur [10, 17].

$$\text{ÖFD} = \frac{2PA^2b}{\mu\omega} \quad (1)$$

ÖFD : Özgül filtre direnci (m kg<sup>-1</sup>)

P : Uygulanan filtre basıncı (N m<sup>-2</sup>)

A : Filtre Alanı (m<sup>2</sup>)

b : Filtre süresi (t) ve süzülen su hacmi (V) grafiğinin eğimi (s m<sup>-6</sup>)

µ : Filtratın dinamik vizkozitesi (N s m<sup>-2</sup>)

ω :Kek ağırlığının süzüntü hacmine oranı (kg m<sup>-3</sup>)

Numunelerin mikrografları karışımlar hazırlandıktan hemen sonra alınan numuneler kullanılarak çekilmiştir. SEM görüntüleri ise, 105 °C' de kurutulmuş numunelerin 5 nm kalınlığında altınla kaplanmasından sonra taramalı elektron mikroskobu(SEM) (JEOL – JSM - 6060 LV Model). kullanılarak elde edilmiştir. Numunelerin

SEM içerisindeki yüksek vakum nedeniyle şekil değiştirmemesi için soğuk aşama uygulanmıştır. Ayrıca numune hazırlama işlemleri sırasında numunelerin yapısının zarar görmediğinden emin olmak amacı ile her materyal den üç replikasyon hazırlanmış ve bunlardan elde edilen görüntüler birbirleri ile karşılaştırılmıştır[18,19]. Tüm analizler üç tekerrürlü olarak yapılarak sonuçların ortalamaları ve standart hataları sunulmuştur. Bununla birlikte biyokütle ve kömür külünün etkinliğinin karşılaştırılması amacıyla, filtre keki nem miktarı ve özgül filtre direnci değerlerinin determinasyon katsayıları verilmiştir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Evsel atık su arıtma çamurunun özelliklerinin, arıtılan atık su özelliklerine ve kullanılan arıtma prosesine göre değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Bundan dolayı çalışmada kullanılan evsel atık su arıtma çamurunun bazı özellikleri ve bu özelliklerin literatürdeki benzer çalışmalarda kullanılan çamurların özellikleri ile karşılaştırılması Tablo 2' de verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde, kullanılan arıtma çamurlarının organik madde ve filtre keki nem miktarı dışındaki diğer özelliklerinin, literatürde verilen değer aralığında olduğu, organik madde değerinin literatür değer aralığının alt sınırına, filtre keki nem miktarının ise literatür değer aralığının üst sınırına çok yakın bulunduğu görülmektedir [10, 11, 17, 20, 21, 22].

Biyokütle ve kömür küllerinin arıtma çamurlarına değişik oranlarda ilave edilmesi ile hazırlanan karışımlar ile polielektrolit kullanılan kontrol uygulamasının pH, elektriksel iletkenlik, organik madde değerler ve su verme özelliklerini gösteren değerler Tablo 3' de sunulmuştur. Her iki kül numunesinin pH değerleri de arıtma çamurunun pH değerinden (6,17) yüksektir. Bundan dolayı karışımlar içindeki kül oranları yükseldikçe karışımların pH değeri de artmıştır. Ayrıca biyokütle külünün pH değeri (11,93) kömür külünden (9,1) daha yüksek olduğundan tüm biyokütle külü kullanılan karışımların pH değerleri, kömür külü kullanılan karışımlarinkinden yüksek bulunmuştur. Polielektrolit uygulaması çamurun pH değerinde önemli bir değişiklik yapmamıştır. Karışımların organik madde miktarları ise karışımda kullanılan kül oranlarını yükseldikçe azalmaktadır. Arıtma

çamurunun başlangıç organik madde miktarının %58,35 olduğu düşünüldüğünde, en yüksek kül oranlarının kullanıldığı BÇ<sub>6</sub> ve KÇ<sub>6</sub> uygulamalarında karışımların organik madde miktarlarının başlangıç değerinin yarısına düştüğü söylenebilir.

Tablo 2. Çalışmada kullanılan arıtma çamurunun özellikleri ve literatürde verilen değerler (Properties of sewage sludge used in the study and the values given in the literature)

Parametreler	Arıtma Çamuru	Literatürdeki Değerler*
Su İçeriği (%)	96,07±0,04	96-99
Kuru Madde (g l <sup>-1</sup> )	39,3±0,04	20-80
Organik Madde (%)	58,35±3,15	60-80
pH	6,17±0,43	5.0 - 8.0
Özgül Filtre Direnci (10 <sup>11</sup> m kg <sup>-1</sup> )	(16,4±0,69).10 <sup>12</sup>	8.10 <sup>12</sup> -18.10 <sup>12</sup>
Filtre Keki Nem Miktarı (%)	91,72±0,12	86-90

\* [10, 11, 17, 20, 21, 22].

Başlangıçta ham çamurun özgül filtre direnci 164.10<sup>11</sup> olarak ölçülmüştür (Tablo 2). Polielektrolit kullanılan kontrol uygulamasında ise bu değer azalmış ve özgül filtre direnci 2,8.10<sup>11</sup> olarak bulunmuştur. Kül kullanılan uygulamaların tamamı, polielektrolit uygulamasının özgül filtre direnci değerine göre yüksek olmakla birlikte, başlangıç özgül filtre direnci değeri önemli ölçüde düşürmüştür. Biyokütle külü kullanılan uygulamalarda en yüksek ve en düşük özgül filtre direnci değeri 132.10<sup>11</sup> (BÇ<sub>1</sub>) – 29.10<sup>11</sup> (BÇ<sub>6</sub>) belirlenirken, kömür külü kullanılan uygulamaların en yüksek ve en düşük özgül filtre değerleri 138.10<sup>11</sup> (KÇ<sub>1</sub>) – 34.10<sup>11</sup> (KÇ<sub>6</sub>) olmuştur (tablo 3). Elde edilen sonuçlar, uygulamadaki kül oranının artmasının özgül filtre direncini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Bu düşüş çamurun su verme özelliklerinin iyileşmesine neden olmaktadır. Bu durum Tablo 3' de verilen filtre keki nem miktarı sonuçları ile de doğrulanmaktadır. Başlangıç (ham çamur) değeri %91,72 olan filtrekeki nem miktarı, kül uygulamalarında önemli ölçüde azalmıştır. Kül uygulamalarında en düşük filtre keki nem miktarı %65,92 ile BÇ<sub>6</sub> uygulamasında görülmüş olup, bu değer polielektrolit kullanılan kontrol uygulamasına (%58,96) en yakın değerdir. Bununla birlikte elde edilen sonuçlar literatür de konu ile ilgili çalışmaların sonuçları ile benzer

bulunmuştur. Literatürde kül kullanımının, polielektrolit kullanımına benzer şekilde, içindeki yüksek orandaki  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nedeni ile evsel arıtma çamurunun negatif elektrik yükünü azalttığı ve bu durumun koloidal çamur partiküllerinin stabilitesini bozarak partikülleri birbirine yaklaştırdığı bildirilmektedir[5]. Bunun yanında yine konuyla ilgili çalışmalarda, arıtma çamurlarının çok fazla küçük partikül içerdiği, bu küçük partiküllerin çamur keki içerisindeki su verme gözeneklerini tıkadığı, kül partiküllerinin ise geniş yüzey alanları sayesinde küçük çamur partiküllerini tuttuğu ve biraya topladıkları ifade edilmekte ve bu iki durumun arıtma çamurlarının su verme özelliklerini iyileştirdiği savunulmaktadır[10, 11, 23, 24].

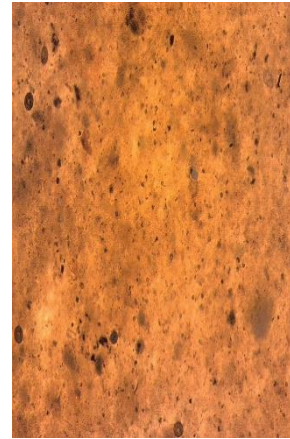
Tablo 3. Hazırlanan karışımların pH, organik madde ve susuzlaştırma ile ilgili özellikleri (PH, organic matter and dewatering properties of prepared mixtures)

Numuneler	pH	Organik Madde (%)	Özgül Filtre Direnci ( $10^{11}$ m $\text{kg}^{-1}$ )	Filtre Keki Nem Miktarı (%)
BK*	11,9±1,04	-	-	-
KK*	9,1±0,7	-	-	-
PÇ*	6,40±0,6	57,02±2,6	2,8±0,2	58,96±1,8
BÇ <sub>1</sub>	8,30±0,8	52,64±2,1	132±7,3	90,45±4,2
BÇ <sub>2</sub>	8,37±0,5	49,25±1,9	118±5,8	89,69±4,9
BÇ <sub>3</sub>	9,18±0,8	42,40±2,4	88±6,1	85,27±5,6
BÇ <sub>4</sub>	9,53±0,6	40,48±1,8	63±6,8	80,91±2,4
BÇ <sub>5</sub>	9,71±0,8	36,16±1,3	48±5,2	72,15±3,1
BÇ <sub>6</sub>	9,91±0,7	31,72±1,6	29±1,8	65,92±5,3
KÇ <sub>1</sub>	6,90±0,5	50,26±2,4	138±9,3	90,86±4,2
KÇ <sub>2</sub>	6,93±0,5	48,13±1,7	122±9,7	89,75±1,8
KÇ <sub>3</sub>	7,03±0,5	43,77±1,9	96±9,4	86,4±1,2
KÇ <sub>4</sub>	7,36±0,3	39,17±3,2	71±4,6	82,25±3,4
KÇ <sub>5</sub>	7,79±0,6	33,73±2,6	57±1,5	77,76±3,8
KÇ <sub>6</sub>	7,83±0,5	30,43±1,4	34±4,9	69,29±2,7

\*BK:biyokütle külü, KK:kömür külü, PÇ:polielektrolit ilave edilmiş arıtma çamuru (kontrol)

Artan oranlarda biyokütle ve kömür külü içeren uygulamaların özgül filtre direnci ve filtre keki nem miktarı değerleri (Tablo 3) göz önünde bulundurularak, her iki kül kullanımında da en iyi sonuçlara sahip uygulamaların mikrograf ve SEM görüntüleri çekilmiştir. Bunun yanında bu uygulamaların mikrograf ve SEM görüntüleri ham arıtma çamuru ve polielektrolit kullanılan kontrol uygulamasının görüntüleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 1). Mikrograf görüntüleri incelendiğinde, ham çamurun katı partiküllerinin dağınık ve birbirine uzak olduğu buna karşın, polielektrolit ve kül içeren uygulamalar olan PÇ, BÇ6 ve KÇ6 uygulamalarında, katı partiküllerin belirgin şekilde bir araya toplandığı görülmektedir. Bu

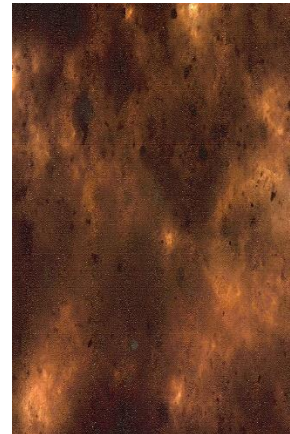
durum SEM görüntülerinde daha belirgindir. Şekil 1' deki SEM görüntüleri incelendiğinde, işlem görmemiş arıtma çamuruna göre, PÇ, BÇ6 ve KÇ6 uygulamalarında, flok oluşumunun ve mukavemetinin arttığı flok kırılmasının azaldığı ve flokların birbirine yaklaştığı söylenebilir. Bu durum benzer çalışmalarda da rapor edilmektedir. Bu çalışmalarda flok oluşumunun su verme özellikleri üzerinde ki en önemli etkisinin, çamur içerisindeki küçük partiküllerin azalması ile bu küçük partiküllerin, filtre kek gözeneklerini tıkamalarının engellenmesi olarak belirtilmektedir. Böylece çamur içindeki su uygulanan mekanik kuvvetlerin etkisiyle daha kolay çamurdan uzaklaşmaktadır[10, 11, 23].



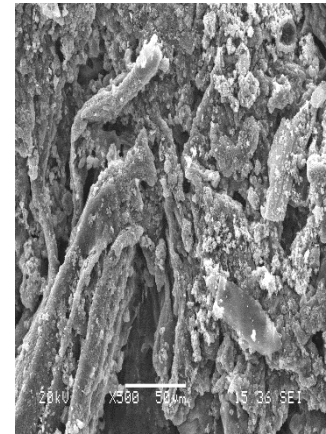
A1. Arıtma Çamuru Mikrografı



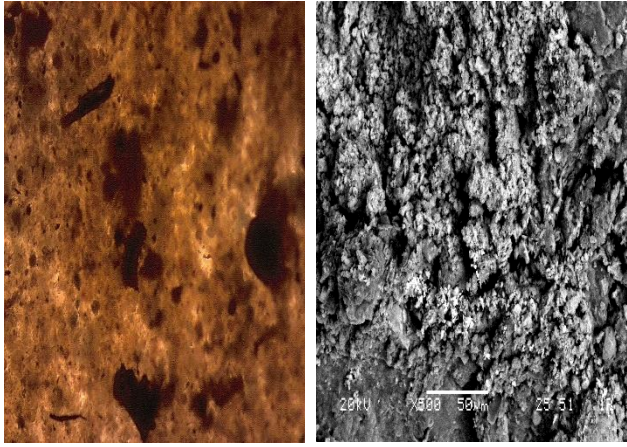
A2. Arıtma Çamuru SEM



B1. PÇ Mikrografı

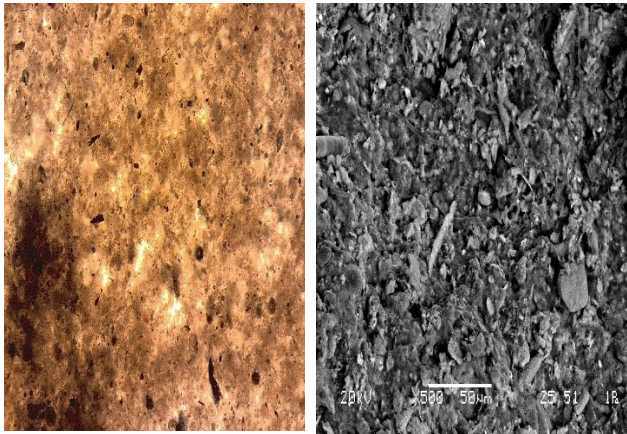


B2. PÇ SEM



C1. BÇ<sub>6</sub> Mikrografi

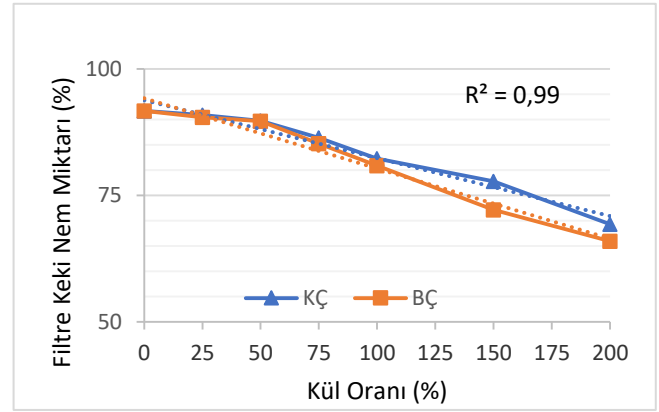
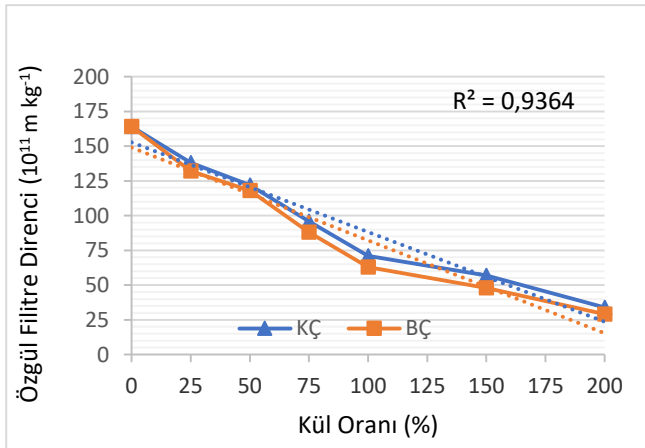
C2. BÇ<sub>6</sub> SEM



D1. KÇ<sub>6</sub> Mikrografi

D2. KÇ<sub>6</sub> SEM

Şekil 1. Bazı numunelerin mikrograf ve SEM görüntüleri (Micrograph and SEM images of some samples)



Şekil 2. Biyokütle ve kömür külü uygulamalarının özgül filtre direncine ve filtre keki nem miktarlarına etkilerinin karşılaştırılması (Comparison of the effects of biomass and coal ash applications on specific filter resistance and filter cake moisture content)

Bununla birlikte bu çalışmada biyokütle külü ve kömür külünün arıtma çamurlarının su verme özellikleri üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır (Şekil 2). Bu karşılaştırma sonucunda, her ne kadar biyokütle külünden elde edilen sonuçlar kontrol uygulamasına daha yakın olsa da, her iki kül uygulamasının özgül filtre direnci ( $R^2 = 0,99$ ) ve filtre keki nem miktarı ( $R^2 = 0,99$ ) değerlerin istatistiksel olarak birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Ancak tablo 4’ de verilen biyokütle ve kömür küllerinin ağır metal değerleri incelendiğinde, Zn değeri dışındaki incelenen tüm parametrelerde kömür külünün ağır metal oranları yüksek bulunmuştur. Bu sonuç dikkate alındığında, kül uygulamaları arasında arıtma çamurunun su verme özelliklerinin iyileştirilmesi açısından önemli bir fark olmamasına rağmen, biyokütle külü kullanımının daha uygun olacağı düşünülmektedir. Özellikle kül uygulamalarının çamurun su verme özellikleri üzerindeki etkisinin %50 gibi yüksek karışım oranından sonra artmaya başladığı göz önünde bulundurulduğunda (Şekil 2), ağır metal oranı düşük olan biyokütle külü kullanımı, arıtma çamurunun ağır metal seviyesinin korunmasında faydalı olacaktır[25].

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, bugüne kadar literatürdeki konu ile ilgili çalışmalarda hiç denenmemiş olan biyokütle küllerinin, kömür küllerinde olduğu gibi, evsel atık su arıtma çamurlarının özgül filtre direncini ve filtre keki

nem miktarını düşürerek su verme özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olabileceğini ortaya koymuştur. Çalışma sonuçları ve literatürde sunulan bilgiler birlikte değerlendirildiğinde, kullanılan kül miktarındaki artışla doğru orantılı olarak, çamurun su verme özelliklerinin iyileştiği ve bu iyileşmede etkili olan unsurların çamurun negatif elektriksel yükünün düşmesi, flok oluşumu ve mukavemetinin artması ve çamur içindeki küçük partiküllerin azalması olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte biyokütle ve kömür külü uygulamalarının çamurun su verme özelliklerine etki düzeyleri arasında önemli bir fark bulunmamıştır. Ancak ağır metal içeriği daha düşük olan biyokütle külü kullanımının, özellikle arıtma çamurlarının susuzlaştırılmasından sonraki, bitki besin elementi veya toprak iyileştirici olarak kullanımı gibi bertaraf seçenekleri için uygun olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4. Çalışmada kullanılan biyokütle ve kömür küllerinin ağır metal değerleri (Heavy metal values of biomass and coal ash used in the study)

Ağır Metaller	Biyokütle Külü	Kömür Külü
Cd (mg.kg <sup>-1</sup> )	2,21±0,2	5,3±1,9
Cu (mg.kg <sup>-1</sup> )	46,28±4,8	58,6±6,8
Ni (mg.kg <sup>-1</sup> )	24,82±5,1	36,9±4,7
Pb (mg.kg <sup>-1</sup> )	25,86±4,8	62,2±14,1
Zn (mg.kg <sup>-1</sup> )	661,18±12,6	286,4±19,2
Cr (mg.kg <sup>-1</sup> )	49,34±7,6	79,3±11,3
Co (mg.kg <sup>-1</sup> )	4,17±0,4	12,6±2,8

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Ş.Yıldız, E.Yılmaz ve E.Ölmez, “Evsel Nitelikli Arıtma Çamurlarının Stabilizasyonla Bertaraf Alternatifleri: İstanbul Örneği”, *Türkiye’ de Katı Atık Yönetim Sempozyumu* (TÜRKAY 2009) YTÜ, 15-17 Haziran, İstanbul, 2009.
- [2] H.Yasui ve M.Shibata, “An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process”. *Water Science and Technology*, sayı 30, 9, pp. 11-20,1994.
- [3] A.Filibeli ve G.E.Kaynak, “Arıtma çamuru miktarının azaltılması ve özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan ön işlemler” *İTÜ dergisi/e Su Kirlenmesi Kontrolü*, cilt:16, sayı:1-3, pp. 3-12, 2006.
- [4] J.H.Bruss, P.H.Nielsen ve K.Keiding, “On the stability of activated sludge flocs with implications to dewatering”, *Water Res.* sayı 26, pp. 1597–1640,1992.
- [5] Y. Chen, Y.S. Chen ve G. Gu, “Influence of pretreating activated sludge with acid and surfactant prior to conventional conditioning on filtration dewatering”, *Chem. Eng. J.* sayı 99 pp. 137–143, 2004.
- [6] E. Friedler ve E. Pisanty, “Effects of design flow and treatment level on construction and operation costs of municipal wastewater treatment plants and their implications on policy making”, *Water Res.* sayı 40, pp. 3751–3758,2006.
- [7] H.Saveyn, G.Pauwels, R. Timmerman ve P.V.Meeren, “Effect of polyelectrolyte conditioning on the enhanced dewatering of activated sludge by application of an electric field during the expression phase”, *Water Res.* sayı 39, pp. 3012–3020,2005.
- [8] H.F.Van der Roest, P.Roeveld ve P.Stamperius, “Optimising sludge treatment in the Netherlands”. *Water*, sayı 21 (8–9), pp. 23–25,1999.
- [9] M.A.Tony, Y.Q.Zhao, J.F.Fu ve A.M.Tayeb, “Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton’s reagent: Effectiveness and optimising study to improve dewaterability”, *Chemosphere*, sayı 72, pp. 673–677, 2008.
- [10] H. Yuan, N. Zhu ve L.Song, “Conditioning of sewage sludge with electrolysis: Effectiveness and optimizing study to improve dewaterability” *Bioresource Technology* sayı 101 pp. 4285–4290, 2010.
- [11] C.Chen, P.Zhangc, G.Zenga, J. Denga, Y. Zhoua ve H.Lud, “Sewage sludge conditioning with coal fly ash modified by sulfuric acid”, *Chemical Engineering Journal*, sayı 158, pp. 616–622, 2010.
- [12] S.V.Vassilev, D.Baxter, L.K.Andersen ve C.G.Vassileva, “An overview of the chemical composition of biomass” *Fuel*, sayı 89, pp. 913–933, 2010.
- [13] X.C.Baxter, L.I.Darvell, J.M.Jones, T.Barraclough, N.E.Yates ve I.Shield, “Miscanthus combustion properties and variations with Miscanthus agronomy” *Fuel* sayı 117, pp. 851–869, 2014.
- [14] O.H. Dede, G. Dede ve S. Ozdemir, “Agricultural and municipal





wastes as container media component for ornamental nurseries” *International Journal of Environmental Research*, sayı 4, pp.193-200,2010.

performance of four different sewage sludge amendments” *Compost Science and Utilization*, sayı 22, pp.207-215, 2014.

5.

- [15] D.Eliche-Quesada ve J. Leite-Costa,” Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay bricks” *Waste Management*, sayı 48, pp. 323–333, 2016.
- [16] W.Lee, S.Kang ve H.Shin, “Sludge characteristics and their contribution to microfiltration in submerged membrane bioreactors” *Journal of Membrane Science*, sayı 216, pp. 217–227, 2003.
- [17] C.H.Lee ve J.C.Liu, “Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning” *Wat. Res. cilt 34*, sayı. 18, pp. 4430-4436, 2000.
- [18] F.Fornes, R. M.Belda, C.Carrion, V. Noguera, P.Garcia-Agustin ve M.Abad, “Pre-conditioning ornamental plants to drought by means of saline water irrigation as related to salinity tolerance” *Scientia Horticulturae*, sayı 113, pp. 52-59, 2007.
- [19] Z.Guo ve W.Liu, “Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: Binary structure and unitary structure” *Plant Science*, sayı 172, pp 1103-1112, 2007.
- [20] S. Özdemir ve N.N. Nuhoglu “Arıtma Çamurları”, *Sakarya Üniveristesi Yayınları* No : 120, 2015
- [21] N. Bohm ve W. M.Kulicke, “Optimization of the use of polyelectrolytes for dewatering industrial sludge of various origins” *Colloid Polym. Sci.* sayı 275, pp. 73-81, 1997.
- [22] S. Chitikela ve S.Dentel “Dual chemical conditioning and dewatering of anaerobically digested biosolids: laboratory evaluations” *Wat. Environ. Res.* sayı 70, pp. 1062-1069, 1998.
- [23] J. Benítez, A. Rodríguez ve A. Suárez, “Optimization technique for sewage sludge conditioning with polymer and skeleton builders”, *Water Res.* sayı 28, pp. 2067–2073, 1994.
- [24] R.J. Wakeman, “Separation technologies for sludge dewatering”, *J. Hazard. Mater.* sayı 144, pp. 614–619, 2007.
- [25] S. Ozdemir, O.H. Dede ve G. Dede, “Comparison of the composting

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 26.09.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 06.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.337268	

## Turizm sektöründe strateji seçimi için bulanık veriler yardımıyla hiyerarşik ağ modeli ve SWOT analizi: Türkiye örneği

G. Nilay Yücenur\*<sup>1</sup>

### ÖZ

Avrupa ve Asya kıtalarının üzerinde konumlanan Türkiye etrafının denizlerle kaplı olması ve bünyesinde barındırdığı doğal ve tarihi zenginlikler nedeniyle hem yerli hem de yabancı turistler için geçmişten günümüze önemli bir cazibe merkezi olmuş ve turizm sektörü Türkiye ekonomisi için önemli bir lokomotif görevi görmüştür. Bu çalışmada Türkiye ekonomisi için önemli bir kaynak olan turizm sektörünün geliştirilmesi için Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı çerçevesinde sektörün güçlü ve zayıf yönleri ile fırsat ve tehditlerini ortaya koyan SWOT analizi ile entegre edilmiş hiyerarşik model açıklanmış ve Türkiye turizm sektörü için en uygun geliştirici stratejinin seçilmesine çalışılmıştır. Bu noktada üçgensel sayılar ile değerlendirilen hiyerarşik modelin kriter ve alt kriterleri önce bulanık analitik hiyerarşi prosesi (Bulanık AHP) ve ardından da bulanık analitik ağ prosesi (Bulanık ANP) yöntemleri ile çözümlenmiş ve her iki teknikte bulunan strateji sıralamaları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar kelimeler:** SWOT analizi, Bulanık AHP, Bulanık ANP, strateji seçimi, Türkiye turizm sektörü

### Hierarchical network model and SWOT analysis for a strategy selection problem in tourism sector with fuzzy data: case of Turkey

### ABSTRACT

Tourism sector is very important for Turkey economy because of the size of domestic and foreign tourist number of Turkey. Turkey has been a key tourism point from past to present. It is located in both Asia and Europe continents and it has lots of naturel and historical resources. In this paper, we analyzed Turkish tourism sector in a hierarchical network model which was integrated with SWOT analysis with its strengths, weaknesses, opportunities and threats branches in concept of Turkish 10th Five Years Development Plan's for selecting the most suitable tourism strategy. In this study the hierarchical model was analyzed by triangular numbers. Firstly, model's criteria and sub-criteria were analyzed by fuzzy AHP, and secondly they analyzed by fuzzy ANP. In conclusion, the results were compared and the ratings and ordering of the alternative tourism strategies were presented.

**Keywords:** SWOT analysis, fuzzy AHP, fuzzy ANP, strategy selection, Turkish tourism sector

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Beykent Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ayazağa Kampüsü, İstanbul. [nilayyucenur@beykent.edu.tr](mailto:nilayyucenur@beykent.edu.tr), 0212 4441997-1933.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye ekonomisinin yapı taşlarından biri hiç şüphesiz ki turizm sektörüdür. Sahip olunan stratejik konum, doğal ve tarihi zenginlikler ile hem yerli turist için önemli alternatifleri bünyesinde bulunduran sektör, vize serbestisinin gündemde olması, ucuz ve kolay ulaşım olanakları ile yabancı turistler için de hali hazırda dünyadaki en iyi tatil alternatiflerinden biridir.

Günümüzde sağlık turizmi ve kongre turizmi şeklinde çeşitlenme ile de her açıdan gelişmeye ve tanıtıma ihtiyaç duyan turizm sektörü dikkatleri üzerine çekmektedir. Turizmin artan ekonomik yararları, uzayan turizm dönemleri ve tüm yıl boyunca yapılabilen deniz ve tarih turları ile çok sayıda turizm çeşidini bünyesinde barındıran Türkiye, kongre, sağlık ve kaplıca, spor, yayla, golf, kış ve dağ turizmi gibi Dünya’da da trend olan yeni turizm çeşitlerini de geliştirmeli ve kaynaklarını bu noktada iç ve dış turizmin hizmetine hazırlamalı ve sunmalıdır [1].

Bu noktada özellikle Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı’nda üzerinde oldukça fazla durulan turizm sektörünün güçlü ve zayıf yönleri, fırsat ve tehditleri ile ortaya konan SWOT analizi çerçevesinde Türkiye için sektörü canlandıracak ve ayakta tutacak en uygun gelişim stratejisinin seçilebilmesinde yol gösterici bir nitelik taşıması açısından bu makale çalışması gerçekleştirilmiştir. Kalkınma planı çerçevesinde kurulan SWOT analiz yapı modeli öncelikle çok kriterli karar verme yöntemlerinden (ÇKKVY) biri olan analitik hiyerarşi prosesi ardından da kriterlerin birbirleriyle olan nispi ilişkilerini ortaya koyan analitik ağ prosesi yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Kriter ve alt kriterlerin değerlendirilme işlemi bulanık mantık çerçevesinde üçgensel sayılar ile gerçekleştirilmiştir.

Bu makale çalışmasında kullanılan teknikler incelendiğinde literatürde bulanık AHP ve bulanık ANP yöntemlerinin farklı sektör ve alanlarda uygulamalarına rastlamak mümkündür. Örneğin, Taylan ve diğerleri [2] bulanık AHP yöntemi ile bir araya getirdikleri TOPSIS yöntemini petrokimya endüstrisinde enerji proseslerinin etkinliğinde, Prakash ve Barua [3] aynı iki yöntemi tersine lojistik çözümlerinin önceliklendirmesinde, Büyüközkan ve Çifçi [4] sağlık endüstrisinde elektronik hizmet kalitesinin stratejik analizinde ve Zyoud ve diğerleri [5]

gelişmekte olan ülkelerdeki su kaybı yönetiminde kullanmışlardır. Mosadeghi ve diğerleri [6] kentsel arazi kullanımı planlamasında bulanık AHP yönteminden yararlanırken, Kumar ve diğerleri [7] veri zarflama analizi ile entegre ettikleri bulanık AHP ile telekom sektöründe müşteri tercihlerinin değerlendirilmesi üzerinde çalışmışlardır. Öte yandan Kuo ve diğerleri [8] de bulanık ANP yöntemi ile yine TOPSIS yöntemini bir araya getirerek tedarikçilerin karbon performansını değerlendirmiş, Ignatius ve diğerleri [9] bulanık ANP yöntemi ile kalite fonksiyonu göçerimi (QFD) yöntemlerini inşaat sektöründeki yeşil yapılanma değerlendirmesi için kullanmışlardır. Gupta ve Narain [10] en iyi e-business stratejisinin seçiminde bulanık ANP yönteminden yararlanırken, Chang ve diğerleri [11] işletme kaynak planlama sistemindeki risk değerlendirme aşamasında yine aynı yöntemden faydalanmışlardır.

Bu çalışmanın asıl çözüm yöntemi olan bulanık AHP ve bulanık ANP uygulamalarına bakacak olursak da literatürde, Aragones-Beltran ve diğerleri [12] solar-termal enerji yeri tesisi yatırım projelerinin seçimi, Yücenur ve diğerleri [13] SWOT analizi ile oluşturulan ekonomik politika seçimi, Yücenur ve diğerleri [14] global tedarik zinciri sürecinde en uygun tedarikçinin seçimi, Ömürbek ve Tunca [15] inşaat sektöründe hizmet veren optimum hazır beton firmasının belirlenmesi hakkında gerçekleştirdikleri çalışmaları literatüre kazandırmışlardır.

Özet olarak, bu çalışma yukarıda değinilen literatür araştırması ışığında üç ana amaç etrafında düzenlenmiştir:

1. Türkiye ekonomisinin en önemli yapı taşlarından biri olan turizm sektöründe gelişim stratejisi seçiminin yapılması,
2. Bu seçim yapılırken literatürde daha önce sektörel anlamda bir araya getirilmemiş olan SWOT analizi yapısı temelinde Bulanık AHP / Bulanık ANP yöntemlerinin kullanılması,
3. Ortaya konan sonuçların karşılaştırılarak Türkiye’nin turizm sektörü için önerilen stratejilerin detaylı analizinin yapılmasıdır.

Bu amaçlar doğrultusunda, çalışmanın ilk bölümünde Türkiye’nin genel ekonomik yapısı üzerinde durulurken, turizm sektörünün ekonomik yapı içerisindeki öneminden ve Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı’ndaki yerinden bahsedilmiş, diğer bölümde ise strateji seçim problemi için T.C.

Kalkınma Bakanlığı tarafından 2014 yılında oluşturulan turizm sektörünün güçlü ve zayıf yönleri ile fırsat ve tehditlerini ortaya koyan model yapısı kriter ve alt kriterleri ile tanımlanmış bir sonraki bölümde de çözüm yöntemleri ile uygulama aşaması açıklanmış ve karşılaştırmalı sonuçlara son bölümde yer verilmiştir.

## 2. TÜRKİYE'DE TURİZM SEKTÖRÜNÜN GENEL YAPISI (THE COMMON STRUCTURE OF TOURISM SECTOR IN TURKEY)

Eski zamanlardan günümüze kadar süre gelen insanların öğrenme ve yeni yerler keşfetme merakı kişileri seyahat etmeye ve kültürel, doğal ve tarihi zenginliklerle tanışmaya davet etmektedir. Sosyal ve ekonomik gelişmeyle eş zamanlı olarak, yükselen kişisel gelir düzeyi, artan ulaşım araçlarının hız ve kapasiteleri, azalan çalışma süreleri, gelişen enformasyon ve iletişim teknolojileri ve artan ücretli tatiller ile zamanla bütün dünya insanlarını etkileyen turizm faaliyeti, bugün sahip olduğu boyut ve önem ile uluslararası bir nitelik kazanmıştır [16]. Turizm, 20. yüzyılın ikinci yarısından itibaren dünya ekonomisinde en hızlı gelişen ve genişleyen sektörlerden biri haline gelirken, önceden bölgesel ve/veya ulusal kalkınma için bir araç sayılan sektör, ödemeler dengesi sorunlarının giderilmesinde ve gelir ve istihdamın yanı sıra vergi gelirlerinin artırılmasında da önemli bir rol oynamaktadır [17].

Dünya genelinde oldukça önemli bir yere sahip olan turizm sektörü Türkiye ekonomisi için de önemli bir girdi kaynağıdır. Türkiye Seyahat Acenteleri Birliği'nin verilerine göre Türkiye'nin gayri safi milli hasılası içindeki turizmin payı, 1965 yılında % 0.2 iken, 1975 yılında % 0.5, 1985 yılında % 2.8, 1995 yılında % 2.9, 2005 yılında % 4.2 ve geçtiğimiz sene 2015 yılında ise % 6.2 olarak gerçekleşmiştir [18].

Türkiye'de 1980 yılından sonra, sosyal, kültürel ve ekonomik etkileri büyük boyutlara ulaşan turizm sektöründe önemli atılımlara imza atılmış ve sektör Türkiye ekonomisinde en gözde sektörlerden biri haline gelmiştir [19]. 1982 yılında yürürlüğe giren 2634 sayılı Turizmi Teşvik Kanunu da sektörün ekonomi içerisindeki payının artmasında önemli bir rol oynamış ve uluslararası turizm gelirleri II. Dünya Savaşı'nın sona ermesinden sonra sürekli olarak artış eğilimi göstermiştir [20].

Bu noktada, Türkiye'de 1960'lı yıllardan itibaren günümüze kadar ulaşan turizm sektörü için devlet ve hükümet çalışmaları kapsamında hazırlanan beş yıllık kalkınma planları sektörde politikaların geliştirilmesi, yerli ve yabancı turizmde yaşanan yeni eğilimlerin takip edilmesi ve ortaya çıkan yeni turizm tarzlarına uyum sağlanmasında yol gösterici olmaktadır. Geçmişten günümüze bu kalkınma planlarının içerikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir (Soyak, 2013):

- Birinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1963-1967): Ülke ekonomisine döviz kazandırma ve ödemeler bilançosu açığını kapatma görevinin öne çıkarıldığı 1. Beş Yıllık Kalkınma Planı'nda sektör için kitle turizmi ve sosyal turizm kavramları gündeme getirilmiştir.
- İkinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1968-1972): Yapılan 2. Beş Yıllık Kalkınma Planı kapsamında ilk defa dış turizm gelirleri ve yabancı turist sayısını artırmak için yatırımların deniz kıyısı bölgelerinde özellikle de Akdeniz ve Ege kıyılarında yoğunlaştırılması gerekliliği ortaya atılmıştır.
- Üçüncü Beş Yıllık Kalkınma Planı (1973-1977): Kitle turizminin çok daha net bir şekilde öne çıkarıldığı 3. Beş Yıllık Kalkınma Planı'nda sektörün tüm organizasyonu ve kamu denetiminin kitle turizmüne uygunluğunun sağlanması üzerinde durulmuştur.
- Dördüncü Beş Yıllık Kalkınma Planı (1979-1983): Fiilen uygulama imkanı bulamayan 4. Beş Yıllık Kalkınma Planı, devletin turizm altyapı yatırımlarına yöneldiği ve üstyapı yatırımları ile işletmeciliğini ise özel sektöre bıraktığı, devletin ancak öncü ve örnek üstyapı tesisleri yapmakla yükümlü kılındığı gibi konularla ilgili olmuştur.
- Beşinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1985-1989): 5. Beş Yıllık Kalkınma Planı Turizm Bankası'nın doğrudan yatırım yapmak yerine fonlarını kredi olarak kullanırması tercihinin kullanılmasına olanak sağlamıştır.
- Altıncı Beş Yıllık Kalkınma Planı (1990-1994): Sektördeki teşvik programları 6. Beş Yıllık Kalkınma Planı ile birlikte kış, av ve su sporları ile festival, gençlik, kongre, sağlık, termal ve golf turizmini de daha cazip hale getirecek şekilde düzenlenmiştir.

- Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (1996-2000): Tüketici taleplerinin dikkate alınarak yeni alternatif turizm alanlarının yaratılacağı konusunda çalışmaların yapıldığı 7. Beş Yıllık Kalkınma Planı küçük ölçekli işletmelerin geliştirilmesi hususuna da özel bir önem vermiştir.
- Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı (2001-2005): 8. Beş Yıllık Kalkınma Planı'nda tanıtım ve pazarlama konuları üzerinde özellikle durulmuş ve belirledikleri fiyat ve koşullar ile Türkiye'deki turizm sektörünü olumsuz etkileyen tekelleşen yabancı tur operatörlerine dikkat çekilmiştir.
- Dokuzuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı (2007-2013): Bulunduğu dönem içerisinde artan yatak kapasitesi ve kaydedilen önemli gelişmelere istinaden 9. Beş Yıllık Kalkınma Planı'nda tanıtım ve pazarlama konusunda yapılması gerekli olan tüm bu artış ve gelişmeleri destekler nitelikteki reformların oluşturulması gerektiğine yer verilmiştir.

## 2.1. Türkiye ekonomisi için turizmin önemi (The importance of tourism for Turkey economy)

Günümüzde turizm sektörü bir ülkenin ekonomik, kültürel ve sosyal yaşam alanlarında kazanç elde edebilmesini sağlayan en önemli hizmet sektörlerinden biri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Turizmin genel olarak ekonomik önemi temelde ülkeye gelmiş olan turistlerin orada gerçekleştirmiş oldukları harcamalar olarak nitelendirilse de sektörün asıl ulusal ve uluslararası bağlamdaki önemi yaptıkları bu harcamalar ile başta yöre halkının ekonomisine ardından da ülke ekonomisine sağladıkları pozitif katkılardır. Bu harcamalar ve aktarımlar sayesinde her yıl Dünya üzerinde gelişmiş ekonomilerden diğer ekonomilere büyük miktarlarda değer aktarımı turizm akımları ile yapılmaktadır [1]. Gelişime açık, turizm potansiyeli yüksek ülkeler uluslararası turizm faaliyetlerine gösterecekleri ilgi ve önem ile bu girdi akımlarını sağlayarak ülkelerinde ekonomik gelişimleri hızlandırabilmeyi ve ülkedeki refah düzeyini gelirlerin tabana yayılması ile sağlayabilmeyi amaçlamaktadırlar [17]. Bu noktada, Tablo 1 incelendiğinde Türkiye'nin 2013 ve 2014 yıllarında sahip olduğu turist sayısı baz alınarak dünya genelinde 6. sırada olduğu görülmekte dolayısıyla da bu artışın devamının

sağlanmasının sektör açısından ne kadar önemli olduğu ortaya konmaktadır.

Tablo 1. En çok turist çeken ülkeler (The most attracting tourist countries) [21]

Ülke	2013 (milyon kişi)	2014 (milyon kişi)	Değişim (%)
Fransa	83.6	83.7	0.1
A.B.D.	70	74.8	6.9
İspanya	60.7	65	7.1
Çin	55.7	55.6	-0.2
İtalya	47.7	48.6	1.9
Türkiye	37.8	39.8	5.3
Almanya	31.5	33	4.8
İngiltere	31.1	32.6	4.8
Rusya	28.4	29.8	4.9
Meksika	24.2	29.1	20.2

Turizm sektörü, günümüzde Türkiye ekonomisi için hükümetler tarafından enflasyona, işsizliğe ve dış ticaret açığına karşı kullanılabilir bir yol olarak görülmekte ve sektör sayesinde sağlanan döviz girdileri, istihdam olanakları ve kurulan iletişim kanalları ile sektör oluşturulan toplumsal barış ve Dünya barışının korumasında büyük bir öneme sahip olmaktadır [17]. Ayrıca turizm sektörü ekonomik büyümenin sağlanmasında da önemli bir rol üstlenerek özellikle ulaşım, konaklama, tur operatörleri ve turistlerin satın aldıkları mal ve hizmetler ile de ülke ekonomisi için büyük bir gelir girdisi sağlamaktadır [22].

Ülkedeki gelir artışının yanı sıra Türkiye ekonomisi içinde yükselen turizm sektörünün payı, artan turizm yatırımları, büyüyen yatırım ölçekleri ekonomik ve politik açıdan da güçlenmeyi sağlamaktadır [19].

Tablo 2. Türkiye'ye gelen turist sayısı / Ocak-Mart (The number of tourist in Turkey / January-March) [21]

Ülke	2015	2016	Değişim (%)
------	------	------	-------------

Almanya	548.083	483.790	-11.73
İspanya	41.899	25.183	-39.90
İsveç	57.035	37.618	-34.04
İtalya	75.767	51.045	-32.63
Yunanistan	150.491	125.027	-16.92
A.B.D.	93.978	87.234	-7.18
Japonya	28.246	12.537	-55.61
Güney Kore	65.298	34.002	-47.93
Azerbaycan	126.886	105.559	-16.81
Gürcistan	336.883	432.703	28.44
Kazakistan	37.403	23.228	-37.90
Özbekistan	30.982	23.845	-23.04
Rusya	150.840	66.127	-56.16
Ukrayna	75.332	89.206	18.42
Cezayir	29.696	33.124	11.54
Libya	58.066	16.118	-72.24
Irak	159.203	103.449	-35.02
Lübnan	24.367	32.329	32.68
Ürdün	17.963	25.165	40.09
İsrail	21.078	40.831	93.71
Çin Halk Cumhuriyeti	48.050	39.471	-17.85
<b>Toplam</b>	<b>4.530.224</b>	<b>4.063.477</b>	<b>-10.30</b>

Tablo 2'ye göre geçtiğimiz yıl ve içinde bulunduğumuz yılın ilk 3 aylık verilerine bakıldığında hem ülkeye gelen turistlerin ülkelere göre dağılımında farklılıklar ve hem de ülkeye giriş yapan toplam turist sayısında yüzde 10.30'luk oranda geçen yılın aynı dönemine göre azalma söz konusudur. WTO (World Tourism Organization)'nun hazırladığı rapor verileri göz önüne alındığında, 2020 yılında 1.6 milyar dolaylarında olacağı öngörülen turist sayısının sektörde dünya genelinde 2 trilyon dolarlık bir harcama potansiyeli yaratacağı düşünülmekte ve yine aynı rapora göre ise tüm bu büyük harcama kitlesinden Türkiye en çok pay alacak olan ilk on ülke arasında yer alamayacağı öngörülmektedir [19]. Bu nedenle de Türkiye'nin en önemli ekonomik kaynaklarından biri olan turizm sektörünü ayakta ve canlı tutması, uygun stratejilerle sektörü geliştirmesi önemlidir.

## 2.2. Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı'nda turizmin önemi (The importance of tourism in 10th Five Years Development Plan)

Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı içerisinde yer verilen Özel İhtisas Komisyonu Raporu'na göre Türkiye'nin en önemli sektörlerinden biri olan turizm sektörü gerçekleştirilecek çalışma ve yatırımlar ile ziyaretçi sayısını artıracak, turizm gelirleri bazında Dünya genelindeki ilk 5 ülke arasına girecek ve eğitilen nitelikli işgücü, yüksek teknik altyapı ve sunulan yüksek kalitedeki tesis ve servis olanakları ile uluslararası bir marka haline gelecektir [23].

Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı'na bakıldığında uluslararası bir marka haline gelinebilmesi için turizmde nitelikli işgücü, tesis ve hizmet kalitesinin sağlanması, ürün ve hizmetlerin çeşitlendirilmesi ve iyileştirilmesi ile üst gelir grubuna daha fazla hitap edilmesi ve artan kalite ve sürdürülebilirlik ile bölgesel kalkınmada lokomotif bir sektör olunması temel amaç olup bu amacın gerçekleştirilebilmesi için de aşağıda verilen politikalar geliştirilmiştir [24]:

- Eğitimli ve nitelikli işgücü ile yüksek kalitede hizmet vermek,
- Dış tanıtım faaliyetlerini müşteri gelişmelerinin ışığında etkinleştirmek,
- Alternatif turizm türlerinin gelişimini desteklemek,
- "Varış Noktası Yönetimi" kapsamında turizm türlerini bütüncül olarak ele alan yeni projeler oluşturmak,
- Halkın, yerel yönetimlerin ve sivil toplum kuruluşlarının turizmle ilgili kararlara katılımını artırmak,
- Turizmin sosyo-kültürel ve çevresel olumsuzluklarını sürdürülebilir turizm uygulamaları ile azaltmak.

## 3. TURİZM SEKTÖRDE STRATEJİ SEÇİMİ İÇİN HİYERARŞİK AĞ MODELİ (HIERARCHICAL NETWORK MODEL FOR A STRATEGY SELECTION IN TOURISM SECTOR)

Bu çalışmanın temelini oluşturan turizm sektörü için gelişim stratejisinin seçilmesi probleminin SWOT analiz modeli T.C. Kalkınma Bakanlığı tarafından hazırlanan Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı (2014-2018) çerçevesinde oluşturulan Turizm Özel İhtisas Komisyonu Raporu çalışmasından alınmıştır [23]. Rapora

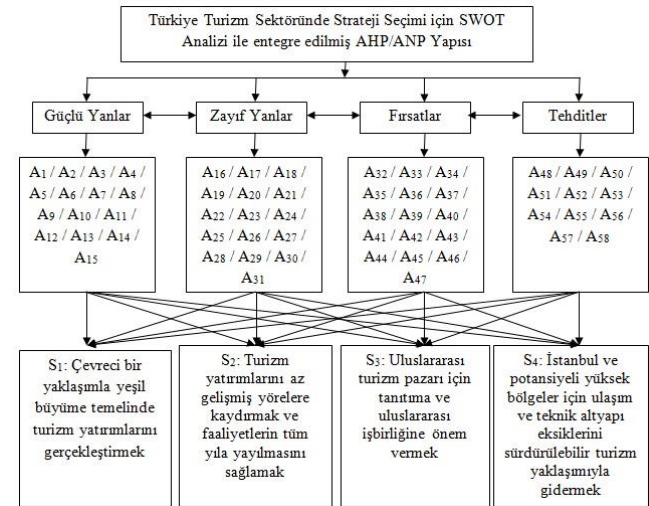
göre, Dünya'daki ve Türkiye'deki turizm trendlerine bağlı olarak Türkiye'nin karşı karşıya kaldığı fırsat ve tehditler ile güçlü ve zayıf yanları aşağıdaki gibi belirlenmiş olup hiyerarşik ağ modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.

### 3.1. Turizm stratejisi seçimi için kullanılan modelin kriter ve alt kriterleri (Model's used criteria and sub-criteria for tourism strategy selection)

**Güçlü Yanlar (K<sub>1</sub>):** Türkiye'nin turizm sektörü için kullanılan SWOT analizi modelinde güçlü yanlar kriterinin alt kriterleri şöyle sıralanabilir: Farklı turizm türleri için uygun iklim koşullarının varlığı (A<sub>1</sub>), Yüksek çeşitlilikteki turizm olanakları (A<sub>2</sub>), Zengin kültürel miras (A<sub>3</sub>), Konukseverlik (A<sub>4</sub>), Genç ve dinamik nüfus yapısı (A<sub>5</sub>), Doğu ile Batının bileşimi ile sağlanan özellikler (A<sub>6</sub>), Türkiye için yüksek tanınmışlık ve zengin ulaşım olanakları (A<sub>7</sub>), Uzak pazarlar için cazip bir alternatif olması (A<sub>8</sub>), İç turizmdeki hareketlilik (A<sub>9</sub>), Turizm çeşitliliğini sağlayan coğrafik yapı (A<sub>10</sub>), Yatırımcıların turizme ilgisinin artması (A<sub>11</sub>), Değişiklik gösteren talep yapısına uyum sağlayabilme (A<sub>12</sub>), Yaygınlaşan kış turizmi yatırımları (A<sub>13</sub>), Gelişen gençlik, termal ve sağlık turizmi (A<sub>14</sub>), Uygun kıyı yapıları ve rüzgar ile gelişen yat turizmi (A<sub>15</sub>).

**Zayıf Yanlar (K<sub>2</sub>):** Türkiye'nin turizm sektörü için kullanılan SWOT analizi modelinde zayıf yanlar kriterinin alt kriterleri şöyle sıralanabilir: Hızlı talep artışına karşı destek olan sektörlerin ve altyapının yanıt verememesi (A<sub>16</sub>), Değerlendirilemeyen yenilenebilir enerji potansiyeli (A<sub>17</sub>), Çevre ve yerel mimariyle uyumsuz büyük oteller (A<sub>18</sub>), Planlamada yaşanan yetki karmaşıklığı (A<sub>19</sub>), Dengeli olmayan marina, liman dağılımı ve belgelendirme sorunları (A<sub>20</sub>), Farklı standartlar içeren turizm belgelerinin varlığı ve bunların uyumlaştırılmaması (A<sub>21</sub>), Yeterince korunmayan tarihi ve doğal miraslar (A<sub>22</sub>), Eşgüdümlü olarak kullanılmayan pazarlama ve tanıtım kaynakları (A<sub>23</sub>), Etkin kullanılmayan sosyal medya (A<sub>24</sub>), Yetersiz mesleki belgelendirme (A<sub>25</sub>), Yetersiz çevre bilinci (A<sub>26</sub>), Anlaşılmayan kentsel peyzaj kavramı (A<sub>27</sub>), Katı atık geri dönüşümünün kıyı kesimlerinde yetersiz oluşu (A<sub>28</sub>), İşlerlik kazanamamış Ulusal Turizm Konseyi ve illerdeki Turizm Konseyleri (A<sub>29</sub>), Farklı karar vericilerdeki kaynaklar ile turizmin bütüncül olarak geliştirilememesi (A<sub>30</sub>), Karar mekanizmalarına yeterince katılmayan yerel halk ve yetkililer (A<sub>31</sub>).

**Fırsatlar (K<sub>3</sub>):** Türkiye'nin turizm sektörü için kullanılan SWOT analizi modelinde fırsatlar kriterinin alt kriterleri şöyle sıralanabilir: Önemi artan Avrasya ve Körfez ülkeleri ile ilişkiler (A<sub>32</sub>), Dünyada artan turizm ilgisi (A<sub>33</sub>), Artan Doğu Akdeniz ilgisi (A<sub>34</sub>), Artan bilinçli turist sayısı (A<sub>35</sub>), Ulaşım olanaklarındaki gelişme ile artan uzun mesafeli seyahatler (A<sub>36</sub>), İç turizmde ucuz havayolu olanakları (A<sub>37</sub>), Uzman seyahat organizatörlerinin varlığı (A<sub>38</sub>), Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler (A<sub>39</sub>), Karadeniz'de başlayan kurvaziye turizmi (A<sub>40</sub>), Dünya'da artan Türkiye ilgisi (A<sub>41</sub>), Artan kongre turizmi yatırımları (A<sub>42</sub>), Bazı ülkeler ile vizenin kaldırılması (A<sub>43</sub>), Kültür ve sanat faaliyetleri ile artan tanıtım (A<sub>44</sub>), Bölgesel kalkınmanın ulusal ve uluslararası fonlu projelerle desteklenmesi (A<sub>45</sub>), Büyük spor etkinlikleri düzenleme imkanları (A<sub>46</sub>), Yüksek sosyal medya kullanımı (A<sub>47</sub>).



Şekil 1. Strateji seçimi için SWOT analizi yapısı ile entegre edilmiş AHP / ANP yapısı (A model structure for a strategy selection SWOT analysis integrated with AHP/ANP)

**Tehditler (K<sub>4</sub>):** Türkiye'nin turizm sektörü için kullanılan SWOT analizi modelinde tehditler kriterinin alt kriterleri şöyle sıralanabilir: Olumsuz medya yayınları (A<sub>48</sub>), Türkiye'nin jeopolitik konumundan kaynaklı dış tehditler (A<sub>49</sub>), Fiyatların uluslararası seyahat organizatörlerince tek taraflı olarak belirlenmesi (A<sub>50</sub>), Yavaş ilerleyen Avrupa Birliği katılım süreci (A<sub>51</sub>), Rakip ülkelerin gelişen rekabet gücü (A<sub>52</sub>), Değişen iklim koşulları ve küresel ısınma (A<sub>53</sub>), Açık denizlerin gemi atıkları ile kirlenmesi ve zarar gören kıyı turizmi (A<sub>54</sub>), Bölgesel güvenlik problemleri (A<sub>55</sub>), Koruma-kullanma dengesinin kıyı bölgelerdeki yoğun kullanım ile bozulması (A<sub>56</sub>), Doğu Akdeniz'de plansız artan marina sayısı (A<sub>57</sub>), Çarpık yapılaşma (A<sub>58</sub>).

### 3.2. Türkiye turizm sektöründe strateji seçimi için alternatifler (The alternatives for a strategy selection in Turkey tourism sector)

Onuncu Beş Yıllık Kalkınma Planı çerçevesinde hazırlanan Turizm Özel İhtisas Komisyonu Raporu temelinde oluşturulan hiyerarşik ağ modelinde yine aynı rapora göre ortaya konabilecek turizm stratejileri aşağıdaki gibidir [23]:

- Çevreci bir yaklaşımla yeşil büyüme temelinde turizm yatırımlarını gerçekleştirmek (S<sub>1</sub>): Turizm yatırımlarını gerçekleştirirken doğanın ve yeşilin korunmasını sağlayarak, çevre ve ekolojik yaşam ile uyumlu projelerin hayata geçirilmesi.
- Turizm yatırımlarını az gelişmiş yörelere kaydırmak ve faaliyetlerin tüm yıla yayılmasını sağlamak (S<sub>2</sub>): Ülke içerisinde keşfedilmemiş bölgelere, kalkınmadan paylarını alabilmeleri için yöneltilecek yatırım faaliyetlerin artırılması ve bu faaliyetlerin kesintisiz olarak tüm yıl boyunca sürdürülmesi.
- Uluslararası turizm pazarı için tanıtıma ve uluslararası işbirliğine önem vermek (S<sub>3</sub>): Özellikle son yıllarda azalan ülkeye giren yabancı turist dikkatini çekmek ve Türkiye'yi tekrar turizm açısından bir cazibe merkezi haline getirmek için gerekli tanıtım ve yabancı paydaşlarla yapılacak işbirliği ve proje çalışmalarının artırılması.
- İstanbul ve potansiyeli yüksek bölgeler için ulaşım ve teknik altyapı eksiklerini sürdürülebilir turizm yaklaşımıyla gidermek (S<sub>4</sub>): Başta İstanbul olmak üzere turizm açısından önemli olan tüm bölgelerdeki ulaşım ve alt yapı sorunlarının kalıcı olarak çözülmesi ve kontrolünün sağlanması.

### 4. ÖNERİLEN MODELİN ÇÖZÜMÜNDE SWOT ANALİZİ VE BULANIK AHP/ANP ENTEGRASYONU (IN PROPOSED MODEL SOLUTION SWOT ANALYSIS INTEGRATED WITH AHP/ANP)

SWOT analizi temelinde konumlandırılmış olup bu çalışmanın konusunu oluşturan strateji seçim probleminde bulanık mantık çerçevesinde kriter ve alt kriterlerin değerlendirilmesi öncelikle AHP

yöntemiyle gerçekleştirilmiş olup, yöntemde kriterlerin ve alt kriterlerin ağırlık vektörleri hesaplanmış ve ardından alternatif stratejilerin değerlendirilmesine geçilmiştir. Kriter ve alt kriterlerin değerlendirilme işlemi sektörde alanında uzman 4 kişi tarafından gerçekleştirilmiş olup uzmanların ortak değerlendirmeleri matrislere yansıtılmıştır. Uzmanlar Türkiye Turizm Derneği, Türkiye Otelciler Birliği ve Türkiye Seyahat Acenteleri Birliği üyelerinden oluşmuş olup halen sektörde aktif olarak rol almaktadırlar.

Yapılan değerlendirmeler ışığında AHP ile bulunan sonucun ardından bu defa SWOT analizinin kollarını oluşturan güçlü yanlar, zayıf yanlar, fırsatlar ve tehditler kriterlerinin birbirlerine göre nispi ilişkileri değerlendirilerek çözüm aşaması bir kez de bulanık ANP yöntemiyle gerçekleştirilmiş yine bu değerlendirme esnasında da aynı uzman görüşlerine başvurulmuştur. Son olarak çalışmanın çözüm aşaması her iki yöntemin sonuç ve sıralamalarının karşılaştırılması ile tamamlanmıştır.

#### 4.1. Çözümün ilk aşaması: Bulanık AHP (The first step of solution: Fuzzy AHP)

Bir veya birden fazla karar vericinin var olduğu belirlilik veya belirsizlik bulunduran ortamlarda karşılaşılan karar verme problemlerinde birden fazla alternatif arasından ikili matris karşılaştırmaları yardımıyla karar verme imkanını sağlayan AHP yöntemi farklı veya benzer fikirdeki grup üyelerinin uzlaşarak ortak bir karar vermeyi sağlaması ve karar verici uzmanın görüşleri ışığında sezgileri hesaba katabilmeyi sağlaması açısından önemli ve kullanılan bir yöntemdir [15].

Çalışmanın ilk çözüm aşamasında stratejilerin bulanık AHP metodu ile çözümlenebilmesi için hesaplama gereksinimlerinin az olduğu ve klasik AHP yönteminin adımlarının takip edildiği Chang'in (1992) genişleme analizi metodu aşağıdaki adımları uygulanarak kullanılmıştır [25]:

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  nesne setini,  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$  ise amaç setini belirtir. Chang'in genişleme analizine göre, alınan her bir nesne, her bir  $g_i$  amacı için genişleme analizi ile yardımıyla değerlendirilir.  $m$  genişleme analizi değerleri alınan her bir nesne için şöyle hesaplanır:



$M_{g_i}^1, M_{g_i}^2, \dots, M_{g_i}^m, i = 1, 2, \dots, n$ . Tüm  $M_{g_i}^j (j = 1, 2, \dots, m)$ 'ler üçgensel bulanık sayılardır.

Aşağıdaki adımlar takip edildiğinde Chang'ın genişleme analizi yöntemi gerçekleştirilebilecektir:

**Adım 1:** Bulanık sentetik genişleme değeri  $i$ . amaca bağlı olarak Denklem 1 ile tanımlanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \otimes \left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} \quad (1)$$

Burada  $\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j$  'yi elde etmek için

$$\sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \left( \sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right), i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

Denklemini sağlayacak şekilde belirli bir matris için bulanık toplama işlemi  $m$  genişleme analizi değerlerine uygulanırken

$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{g_i}^j M \right]^{-1}$  'yi elde etmede de bulanık toplama işlemi  $M_{g_i}^j (j = 1, 2, \dots, m)$  değerleri için hesaplanır:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j = \left( \sum_{i=1}^n l_i, \sum_{i=1}^n m_i, \sum_{i=1}^n u_i \right) \quad (3)$$

Bu hesaplamadan sonra vektörün tersi Denklem 3 ile yapılan hesapla elde edilir.

$$\left[ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{g_i}^j \right]^{-1} = \left( \frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (4)$$

**Adım 2:**  $M_2$ 'nin ve  $M_1$ 'e tercih edilme oranları yani  $M_2 = (l_2, m_2, u_2) \geq M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ 'nin olasılık derecesi Denklem 5 ile tanımlanırken

$$V(M_2 \geq M_1) = \sup_{y \geq x} \left[ \min(\mu_{M_1}(x), \mu_{M_2}(y)) \right] \quad (5)$$

bu tanımlama eşdeğer bir şekilde Denklem 6'daki gibi de gösterilebilir:

$$V(M_2 \geq M_1) = \text{hgt}(M_1 \cap M_2) = \mu_{M_2}(d) = \begin{cases} 1 & \text{eger } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{eger } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{aksihalde} \end{cases} \quad (6)$$

Burada, tanımlanan  $d, \mu_{M_1}$  ve  $\mu_{M_2}$  arasındaki en yüksek kesişme noktası  $D$ 'nin ordinatıdır.

$V(M_1 \geq M_2)$  ve  $V(M_2 \geq M_1)$  değerleri  $M_1$  ve  $M_2$ 'yi karşılaştırmada kullanılır.

**Adım 3:**  $M_i (i = 1, 2, \dots, k)$ ,  $k$  tane konveks bulanık sayıdan daha büyük bir konveks bulanık sayının olasılık derecesidir ve Denklem 7 ile hesaplanır:

$$V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) = V[(M \geq M_1) \text{ ve } (M \geq M_2) \text{ ve } \dots \text{ ve } (M \geq M_k)] = \min V(M \geq M_i) \quad (7)$$

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \text{ olduğu varsayıldığında} \quad (8)$$

Ağırlık vektörü  $k = 1, 2, \dots, n (k \neq 1)$  için Denklem 9 ile elde edilir:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (9)$$

$A_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ,  $n$  elemanıdır.

**Adım 4:** Normalleştirme işlemi aracılığıyla, ağırlık vektörünün normalize edilmiş hali aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (10)$$

Burada  $W$  bulanık olmayan bir sayıdır.

Türkiye'nin turizm stratejilerinin değerlendirilmesi ve en uygun stratejinin seçimi için kurulan bu çalışmanın değerlendirilme aşaması Tablo 4'de verilen ana amaç ışığında ana kriterlerin üçgensel bulanık sayılar ile değerlendirilmesi ile başlamış olup bu değerlendirmelerde kullanılan dilbilimsel değişkenler ve bu değişkenlerin bulanık karşılıkları Tablo 3'de verilmiştir. Çalışmada değişkenler matrisler içerisinde eşlenikleri ile birlikte kullanılmıştır.

Tablo 3. Dilbilimsel değişkenler ve bulanık değerler (Linguistic variables and fuzzy values) [26]

Dilbilimsel Değişkenler	Üçgensel Bulanık Sayılar
EÖ Eşit önemli	(1, 1, 1)
ZÖ Zayıf derecede önemli	(2/3, 1, 3/2)
GÖ Güçlü derecede önemli	(3/2, 2, 5/2)
ÇÖ Çok önemli	(5/2, 3, 7/2)
MÖ Mutlak önemli	(7/2, 4, 9/2)

Tablo 4. Amaca yönelik ana kriterlerin bulanık mantık matrisi (The fuzzy matrix for criteria according to objective)

	Güçlü yanlar	Zayıf yanlar	Fırsatlar	Tehditler
Güçlü yanlar	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2	3/2, 2, 5/2	5/2, 3, 7/2

Zayıf yanlar	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1	2/3, 1, 3/2	3/2, 2, 5/2
Fırsatlar	2/5, 1/2, 2/3	2/3, 1, 3/2	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2
Tehditler	2/7, 1/3, 2/5	2/5, 1/2, 2/3	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1

Tablo 4'e göre  $S_G = (6.50, 9.00, 9.50) \otimes (1/15.72, 1/19.33, 1/23.58) = (0.28, 0.41, 0.60)$ ;  $S_Z = (3.57, 4.50, 5.67) \otimes (1/15.72, 1/19.33, 1/23.58) = (0.15, 0.23, 0.36)$ ;  $S_F = (3.57, 4.50, 5.67) \otimes (1/15.72, 1/19.33, 1/23.58) = (0.15, 0.23, 0.36)$ ;  $S_T = (2.08, 2.33, 2.74) \otimes (1/15.72, 1/19.33, 1/23.58) = (0.09, 0.12, 0.17)$  sonuçları elde edilir. Bu faktör değerlerinin kullanılması ile  $V(S_G \geq S_Z) = 1.00$ ,  $V(S_G \geq S_F) = 1.00$ ,  $V(S_G \geq S_T) = 1.00$ ,  $V(S_Z \geq S_G) = 0.31$ ,  $V(S_Z \geq S_F) = 1.00$ ,  $V(S_Z \geq S_T) = 1.00$ ,  $V(S_F \geq S_G) = 0.31$ ,  $V(S_F \geq S_Z) = 1.00$ ,  $V(S_F \geq S_T) = 1.00$ ,  $V(S_T \geq S_G) = 0.61$ ,  $V(S_T \geq S_Z) = 0.15$ ,  $V(S_T \geq S_F) = 0.15$  değerleri bulunur ve böylece amaca yönelik ana kriterlerin bulanık mantıkla oluşturulan matrisine göre ağırlık vektörü  $W_A = (0.56, 0.18, 0.18, 0.08)^T$  elde edilir.

Ana kriterlerin amaca yönelik olarak bulanık değerlendirilme matrisinin oluşturulmasının ardından her bir alt kriter bağlı bulunduğu ana kritere, her bir alternatif strateji de tüm alt kriterler açısından değerlendirilir. Tablo 5-7-9-11 her bir alt kriterin bağlı bulunduğu ana kritere göre değerlendirilmesinin gösterimini içerirken

Tablo 6-8-10 ve 12 ise Güçlü yanlar, Zayıf yanlar, Fırsatlar ve Tehditler ana kriterlerinin birer alt kriteri açısından alternatif stratejilerin değerlendirilmesine örnek olarak verilmiştir. Matrislerin değerlendirilmesinde benzer işlemler tekrarlanarak bulanık analitik hiyerarşi prosesi sürdürülmüştür.

Tablo 5. Güçlü yanlar ana kriteri için alt kriterlerin bulanık mantık matrisi (The fuzzy matrix for sub-criteria according to strengths)

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	A <sub>7</sub>	A <sub>8</sub>	A <sub>9</sub>	A <sub>10</sub>	A <sub>11</sub>	A <sub>12</sub>	A <sub>13</sub>	A <sub>14</sub>	A <sub>15</sub>
A <sub>1</sub>	EÖ	GÖ	MÖ	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ	ZÖ
A <sub>2</sub>		EÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ	
A <sub>3</sub>			EÖ						ZÖ		ZÖ				
A <sub>4</sub>			GÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ		ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ			
A <sub>5</sub>			GÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ		ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ			
A <sub>6</sub>			GÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ		ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ			
A <sub>7</sub>		ZÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ	GÖ	EÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ	
A <sub>8</sub>			GÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ		EÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ			
A <sub>9</sub>			ZÖ						EÖ		ZÖ				
A <sub>10</sub>			GÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ		ZÖ	GÖ	EÖ	GÖ	ZÖ			
A <sub>11</sub>			ZÖ						ZÖ		EÖ				
A <sub>12</sub>			GÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ		ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	EÖ			
A <sub>13</sub>		ZÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	EÖ	ZÖ	
A <sub>14</sub>		ZÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ	EÖ	
A <sub>15</sub>	ZÖ	GÖ	MÖ	ÇÖ	ÇÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ	EÖ

Tablo 6. Farklı turizm türleri için uygun iklim koşullarının varlığı alt kriteri için alternatif stratejilerin değerlendirilmesi (The fuzzy matrix for strategies according to sub-criteria A<sub>1</sub>)

	Strateji-1 (S <sub>1</sub> )	Strateji-2 (S <sub>2</sub> )	Strateji-3 (S <sub>3</sub> )	Strateji-4 (S <sub>4</sub> )
--	------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------

Strateji-1 (S <sub>1</sub> )	1, 1, 1	2/5, 1/2, 2/3	3/2, 2, 5/2	2/3, 1, 3/2
Strateji-2 (S <sub>2</sub> )	3/2, 2, 5/2	1, 1, 1	5/2, 3, 7/2	3/2, 2, 5/2
Strateji-3 (S <sub>3</sub> )	2/5, 1/2, 2/3	2/7, 1/3, 2/5	1, 1, 1	2/5, 1/2, 2/3
Strateji-4 (S <sub>4</sub> )	2/3, 1, 3/2	2/5, 1/2, 2/3	3/2, 2, 5/2	1, 1, 1

$$W_1 = (0.18, 0.56, 0.08, 0.18)^T$$

Tablo 7. Zayıf yanlar ana kriteri için alt kriterlerin bulanık mantık matrisi (The fuzzy matrix for sub-criteria according to weaknesses)

	A <sub>16</sub>	A <sub>17</sub>	A <sub>18</sub>	A <sub>19</sub>	A <sub>20</sub>	A <sub>21</sub>	A <sub>22</sub>	A <sub>23</sub>	A <sub>24</sub>	A <sub>25</sub>	A <sub>26</sub>	A <sub>27</sub>	A <sub>28</sub>	A <sub>29</sub>	A <sub>30</sub>	A <sub>31</sub>
A <sub>16</sub>	EÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	ÇÖ	MÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	MÖ	ÇÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ
A <sub>17</sub>		EÖ		ZÖ	ZÖ	GÖ				GÖ	ZÖ	ZÖ		ZÖ		
A <sub>18</sub>		GÖ	EÖ	GÖ	GÖ	ÇÖ		ZÖ		ÇÖ	GÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ
A <sub>19</sub>		ZÖ		EÖ	ZÖ	GÖ				GÖ	ZÖ	ZÖ		ZÖ		
A <sub>20</sub>		ZÖ		ZÖ	EÖ	GÖ				GÖ	ZÖ	ZÖ		ZÖ		
A <sub>21</sub>						EÖ				ZÖ						
A <sub>22</sub>	ZÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	ÇÖ	MÖ	EÖ	GÖ	ZÖ	MÖ	ÇÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ
A <sub>23</sub>		GÖ	ZÖ	GÖ	GÖ	ÇÖ		EÖ		ÇÖ	GÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ
A <sub>24</sub>	ZÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	ÇÖ	MÖ	ZÖ	GÖ	EÖ	MÖ	ÇÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ
A <sub>25</sub>						ZÖ				EÖ						
A <sub>26</sub>		ZÖ		ZÖ	ZÖ	GÖ				GÖ	EÖ	ZÖ		ZÖ		
A <sub>27</sub>		ZÖ		ZÖ	ZÖ	GÖ				GÖ	ZÖ	EÖ		ZÖ		
A <sub>28</sub>		GÖ	ZÖ	GÖ	GÖ	ÇÖ		ZÖ		ÇÖ	GÖ	GÖ	EÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ
A <sub>29</sub>		ZÖ		ZÖ	ZÖ	GÖ				GÖ	ZÖ	ZÖ		EÖ		
A <sub>30</sub>		GÖ	ZÖ	GÖ	GÖ	ÇÖ		ZÖ		ÇÖ	GÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	EÖ	ZÖ
A <sub>31</sub>		GÖ	ZÖ	GÖ	GÖ	ÇÖ		ZÖ		ÇÖ	GÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	EÖ

$$W_z = (0.15, 0.03, 0.07, 0.03, 0.03, 0.01, 0.15, 0.07, 0.15, 0.01, 0.03, 0.03, 0.07, 0.03, 0.07, 0.07)^T$$

Tablo 8. Hızlı talep artışına karşı destek olan sektörlerin ve altyapının yanıt vermemesi alt kriteri için alternatif stratejilerin değerlendirilmesi (The fuzzy matrix for strategies according to sub-criteria A<sub>16</sub>)

	Strateji-1 (S <sub>1</sub> )	Strateji-2 (S <sub>2</sub> )	Strateji-3 (S <sub>3</sub> )	Strateji-4 (S <sub>4</sub> )
Strateji-1 (S <sub>1</sub> )	1, 1, 1	2/5, 1/2, 2/3	3/2, 2, 5/2	2/7, 1/3, 2/5
Strateji-2 (S <sub>2</sub> )	3/2, 2, 5/2	1, 1, 1	5/2, 3, 7/2	2/5, 1/2, 2/3
Strateji-3 (S <sub>3</sub> )	2/5, 1/2, 2/3	2/7, 1/3, 2/5	1, 1, 1	2/9, 1/4, 2/7
Strateji-4 (S <sub>4</sub> )	5/2, 3, 7/2	3/2, 2, 5/2	7/2, 4, 9/2	1, 1, 1

$$W_{16} = (0.13, 0.20, 0.02, 0.65)^T$$

Tablo 9. Fırsatlar ana kriteri için alt kriterlerin bulanık mantık matrisi (The fuzzy matrix for sub-criteria according to opportunities)

A <sub>32</sub>	A <sub>33</sub>	A <sub>34</sub>	A <sub>35</sub>	A <sub>36</sub>	A <sub>37</sub>	A <sub>38</sub>	A <sub>39</sub>	A <sub>40</sub>	A <sub>41</sub>	A <sub>42</sub>	A <sub>43</sub>	A <sub>44</sub>	A <sub>45</sub>	A <sub>46</sub>	A <sub>47</sub>
-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

A <sub>32</sub>	EÖ	ZÖ														
A <sub>33</sub>	ÇÖ	EÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ			
A <sub>34</sub>	GÖ	EÖ		ZÖ						ZÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ			
A <sub>35</sub>	ÇÖ	ZÖ	GÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ			
A <sub>36</sub>	MÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	EÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	ÇÖ
A <sub>37</sub>	ÇÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ			
A <sub>38</sub>	MÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	EÖ	GÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	ÇÖ
A <sub>39</sub>	ÇÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ			
A <sub>40</sub>	ÇÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	EÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ			
A <sub>41</sub>	GÖ	ZÖ		EÖ						ZÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ			
A <sub>42</sub>	ÇÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	ZÖ	GÖ	EÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	GÖ			
A <sub>43</sub>	MÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	ZÖ	GÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	EÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	ÇÖ
A <sub>44</sub>	GÖ	ZÖ		ZÖ						EÖ	GÖ	ZÖ	ZÖ			
A <sub>45</sub>	ZÖ	EÖ														
A <sub>46</sub>	GÖ	ZÖ		ZÖ						ZÖ	GÖ	EÖ	ZÖ			
A <sub>47</sub>	GÖ	ZÖ		ZÖ						ZÖ	GÖ	ZÖ	EÖ			

$$W_F = (0.02, 0.07, 0.03, 0.07, 0.13, 0.07, 0.13, 0.07, 0.07, 0.03, 0.07, 0.13, 0.03, 0.02, 0.03, 0.03)^T$$

Tablo 10. Önemi artan Avrasya ve Körfez ülkeleri ile ilişkiler alt kriteri için alternatif stratejilerin değerlendirilmesi (The fuzzy matrix for strategies according to sub-criteria A<sub>32</sub>)

	Strateji-1 (S <sub>1</sub> )	Strateji-2 (S <sub>2</sub> )	Strateji-3 (S <sub>3</sub> )	Strateji-4 (S <sub>4</sub> )
Strateji-1 (S <sub>1</sub> )	1, 1, 1	2/3, 1, 3/2	2/7, 1/3, 2/5	2/5, 1/2, 2/3
Strateji-2 (S <sub>2</sub> )	2/3, 1, 3/2	1, 1, 1	2/7, 1/3, 2/5	2/5, 1/2, 2/3
Strateji-3 (S <sub>3</sub> )	5/2, 3, 7/2	5/2, 3, 7/2	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2
Strateji-4 (S <sub>4</sub> )	3/2, 2, 5/2	3/2, 2, 5/2	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1

$$W_{32} = (0.13, 0.13, 0.56, 0.18)^T$$

Tablo 11. Tehditler ana kriteri için alt kriterlerin bulanık mantık matrisi (The fuzzy matrix for sub-criteria according to threats)

	A <sub>48</sub>	A <sub>49</sub>	A <sub>50</sub>	A <sub>51</sub>	A <sub>52</sub>	A <sub>53</sub>	A <sub>54</sub>	A <sub>55</sub>	A <sub>56</sub>	A <sub>57</sub>	A <sub>58</sub>
A <sub>48</sub>	EÖ	ZÖ		ZÖ		GÖ	ZÖ	ZÖ			
A <sub>49</sub>	ÇÖ	EÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ
A <sub>50</sub>	ZÖ	EÖ		ZÖ		GÖ	ZÖ	ZÖ			
A <sub>51</sub>	GÖ	GÖ		EÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ		GÖ	ZÖ
A <sub>52</sub>	ZÖ	ZÖ		EÖ		GÖ	ZÖ	ZÖ			
A <sub>53</sub>	EÖ										
A <sub>54</sub>	ZÖ	ZÖ		ZÖ		GÖ	EÖ	ZÖ			
A <sub>55</sub>	ÇÖ	ZÖ	ÇÖ	GÖ	ÇÖ	MÖ	ÇÖ	EÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ
A <sub>56</sub>	GÖ	GÖ		ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	EÖ		GÖ	ZÖ
A <sub>57</sub>	ZÖ	ZÖ		ZÖ		GÖ	ZÖ	EÖ			
A <sub>58</sub>	GÖ	GÖ		ZÖ	GÖ	ÇÖ	GÖ	ZÖ		GÖ	EÖ

$$W_T = (0.05, 0.21, 0.05, 0.10, 0.05, 0.03, 0.05, 0.21, 0.10, 0.05, 0.10)^T$$

Tablo 12. Olumsuz medya yayınları alt kriteri için alternatif stratejilerin değerlendirilmesi (The fuzzy matrix for strategies according to sub-criteria A<sub>48</sub>)

	Strateji-1 (S <sub>1</sub> )	Strateji-2 (S <sub>2</sub> )	Strateji-3 (S <sub>3</sub> )	Strateji-4 (S <sub>4</sub> )
--	------------------------------	------------------------------	------------------------------	------------------------------

Strateji-1 (S <sub>1</sub> )	1, 1, 1	2/3, 1, 3/2	2/7, 1/3, 2/5	3/2, 2, 5/2
Strateji-2 (S <sub>2</sub> )	2/3, 1, 3/2	1, 1, 1	2/7, 1/3, 2/5	3/2, 2, 5/2
Strateji-3 (S <sub>3</sub> )	5/2, 3, 7/2	5/2, 3, 7/2	1, 1, 1	7/2, 4, 9/2
Strateji-4 (S <sub>4</sub> )	2/5, 1/2, 2/3	2/5, 1/2, 2/3	2/9, 1/4, 2/7	1, 1, 1

$$W_{48} = (0.20, 0.20, 0.55, 0.05)^T$$

Kriterleri oluşturan alt kriter ağırlıklarının ve tüm alt kriterlerin ağırlıklarının hesaplanmasından sonra ise AHP metodolojisinin son adımı olan

öncelik ağırlıklarının birleştirilmesi işlemi ile Tablo 13'de görülen ilk çözüm aşamasının sonucu elde edilir.

Tablo 13. Bulanık AHP metodolojisinin sonuçları (The results of fuzzy AHP)

	Güçlü yanlar	Zayıf yanlar	Fırsatlar	Tehditler	Alternatif öncelik ağırlığı
Kriter ağırlığı	0.56	0.18	0.18	0.08	
Alternatif stratejiler					
S <sub>1</sub> Çevreci bir yaklaşımla yeşil büyüme temelinde turizm yatırımlarını gerçekleştirmek	0.33	0.28	0.18	0.17	<b>0.28</b>
S <sub>2</sub> Turizm yatırımlarını az gelişmiş yörelere kaydırmak ve faaliyetlerin tüm yıla yayılmasını sağlamak	0.28	0.15	0.23	0.12	0.23
S <sub>3</sub> Uluslararası turizm pazarı için tanıtıma ve uluslararası işbirliğine önem vermek	0.24	0.17	0.39	0.28	0.26
S <sub>4</sub> İstanbul ve potansiyeli yüksek bölgeler için ulaşım ve teknik altyapı eksiklerini sürdürülebilir turizm yaklaşımıyla gidermek	0.15	0.40	0.20	0.43	0.23

Tablo 5'e göre S<sub>1</sub> için [(0.56\*0.33) + (0.18\*0.28) + (0.18\*0.18) + (0.08\*0.17)] = 0.28, S<sub>2</sub> için [(0.56\*0.28) + (0.18\*0.15) + (0.18\*0.23) + (0.08\*0.12)] = 0.23, S<sub>3</sub> için [(0.56\*0.24) + (0.18\*0.17) + (0.18\*0.39) + (0.08\*0.28)] = 0.26 ve S<sub>4</sub> için [(0.56\*0.15) + (0.18\*0.40) + (0.18\*0.20) + (0.08\*0.43)] = 0.23 bulunur.

Tablo 13 göstermektedir ki, turizm sektöründe strateji seçim problemi için oluşturulan hiyerarşik modelin bulanık AHP metodu ile bulunan sonucuna göre Türkiye'nin turizm sektöründe en öncelikli stratejisi çevreci bir yaklaşımla yeşil büyüme temelinde turizm yatırımlarını gerçekleştirmek olmalıdır.

#### 4.2. Çözümün ikinci aşaması: Bulanık ANP (The second step of solution: Fuzzy ANP)

AHP yöntemindeki ikili karşılaştırma matrislerini kullanmasına rağmen AHP yönteminden farklı olarak yukarıdan aşağıya doğru oluşturulan hiyerarşik yapıyı incelemekten öte yatay düzlemdeki kriterlerin birbirleri ile olan etkileşimlerini de göz önüne alarak alternatifler arasından seçim yapmayı sağlayan ANP yöntemi kriterler arasındaki ilişkileri ve bu ilişkilerin birbirlerini etkileme yönlerini de tanımlayarak uygun bir ağ yapı modeli oluşturur [15].

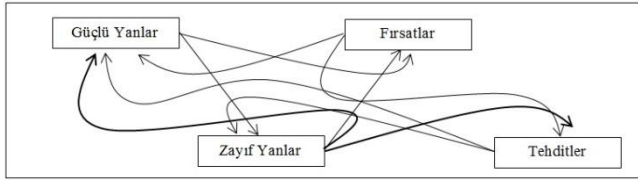
SWOT analizinin temel yapısı üzerinde kurulan ağ modeli bulanık AHP metodunun ardından bulanık

ANP metodu ile devam ettirilir. Çalışmada bulanık ANP metodu Saaty'nin 1996 yılında ortaya koyduğu gibi aşağıdaki 4 adımla işletilir [14]:

- Problem yapısı ve model kurulumu: Hiyerarşik yapı kurulur. Model amaç, kriter, alt kriterler ve alternatifler ile AHP yöntemindeki gibi oluşturulur.
- Öncelik vektörlerinin ve karşılıklı karşılaştırma matrislerinin hesaplanması: AHP yöntemi ile benzer olarak ANP yönteminde de ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulup hesaplanır ve yerel öncelik vektörü belirlenerek bileşenlerin nispi önemleri tahmin edilir.
- Süper matrisin yapılandırılması: Eğer kriterler birbirleri ile ilişkili ise hiyerarşik ağ yapısı ile yer değiştirir.
- En iyi alternatifin seçilmesi: Çalışmanın sonunda, en yüksek toplam öncelik değerini alan alternatif seçilir.

Çalışmamızda öncelikle her bir kriter için diğer kriterler göz önüne alınarak iç bağımlılık matrisleri oluşturulur ve bulanık AHP yönteminde olduğu gibi ağırlık vektörleri hesaplanır. Çalışmada kullanılan SWOT analizi temelli

araştırma modelinin içerisinde oluşturulan kriterler arası iç bağımlılık ilişkisi Şekil 2’de gösterilirken kriterler arasındaki birbirlerine göre göreceli iç bağımlılık matrislerine ise Tablo 14-17’de yer verilmiştir.



Şekil 2. Kriterler arası iç bağımlılık ilişkisi (Inner-relationships among criteria)

Tablo 14. Güçlü yanlar kriteri için iç bağımlılık matrisi (Inner-relationship matrix for strengths)

	Zayıf yanlar	Fırsatlar	Tehditler
Zayıf yanlar	1, 1, 1	2/3, 1, 3/2	3/2, 2, 5/2
Fırsatlar	2/3, 1, 3/2	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2
Tehditler	2/5, 1/2, 2/3	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1

Güçlü yanlar kriteri için iç bağımlılık matrisi  $W_1 = (0.47, 0.47, 0.06)^T$

Tablo 15. Zayıf yanlar kriteri için iç bağımlılık matrisi (Inner-relationship matrix for weaknesses)

	Güçlü yanlar	Fırsatlar	Tehditler
Güçlü yanlar	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2	5/2, 3, 7/2
Fırsatlar	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2
Tehditler	2/7, 1/3, 2/5	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1

Zayıf yanlar kriteri için iç bağımlılık matrisi  $W_2 = (0.81, 0.17, 0.02)^T$ .

Tablo 16. Fırsatlar kriteri için iç bağımlılık matrisi (Inner-relationship matrix for opportunities)

	Güçlü yanlar	Zayıf yanlar	Tehditler
Güçlü yanlar	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2	5/2, 3, 7/2
Zayıf yanlar	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2
Tehditler	2/7, 1/3, 2/5	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1

Tablo 18. ANP metodolojisi için alt kriterler için global ağırlıklar (Global weights for sub-criteria)

Kriterler ve yerel ağırlıkları	Yerel ağırlıklar	Global ağırlıklar
--------------------------------	------------------	-------------------

Güçlü yanlar	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2	5/2, 3, 7/2
Zayıf yanlar	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2
Tehditler	2/7, 1/3, 2/5	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1

Fırsatlar kriteri için iç bağımlılık matrisi  $W_3 = (0.81, 0.17, 0.02)^T$ .

Tablo 17. Tehditler kriteri için iç bağımlılık matrisi (Inner-relationship matrix for threats)

	Güçlü yanlar	Zayıf yanlar	Fırsatlar
Güçlü yanlar	1, 1, 1	3/2, 2, 5/2	3/2, 2, 5/2
Zayıf yanlar	2/5, 1/2, 2/3	1, 1, 1	2/3, 1, 3/2
Fırsatlar	2/5, 1/2, 2/3	2/3, 1, 3/2	1, 1, 1

Tehditler kriteri için iç bağımlılık matrisi  $W_4 = (0.70, 0.15, 0.15)^T$ .

Her bir kriter için bağımlı ağırlıkların hesaplanması tamamlandıktan sonra bu defa da tüm alt kriterler için global (küresel) ağırlıkların hesaplanması gerçekleştirilir. Kriterlerin birbirlerine göre göreceli önem derecelerinin AHP metoduyla elde edilen ağırlıklarla matris çarpımıyla tüm alt kriterler için global ağırlıklar hesaplanır. Global ağırlık değerleri Tablo 18’de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} 1.00 & 0.81 & 0.81 & 0.70 \\ 0.47 & 1.00 & 0.17 & 0.15 \\ 0.47 & 0.17 & 1.00 & 0.15 \\ 0.06 & 0.02 & 0.02 & 1.00 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 0.56 \\ 0.18 \\ 0.18 \\ 0.08 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.45 \\ 0.24 \\ 0.24 \\ 0.07 \end{bmatrix}$$

Son olarak ise, Türkiye’nin turizm sektörü için uygulanabilecek alternatif gelişim stratejilerinin alt kriterler içindeki ilişkilerini yansıtan toplam önceliklerin Tablo 18’de hesaplanmasının ardından alt seviyedeki elemanların (kriterlerin) hangilerinin üst seviyedeki elemanı (amacı) daha çok ve ne kadar etkilediğinin ortaya konacağı süpermatris ve ağırlıklı süpermatris hesaplanarak strateji seçim problemi için çözüm sonucu elde edilir.

<hr/>			
Güçlü yanlar	0.45		
Farklı turizm türleri için uygun iklim koşullarının varlığı		0.17	0.07
Yüksek çeşitlilikteki turizm olanakları		0.09	0.04
Zengin kültürel miras		0.02	0.01
Konukseverlik		0.04	0.02
Genç ve dinamik nüfus yapısı		0.04	0.02
Doğu ile Batının bileşimi ile sağlanan özellikler		0.04	0.02
Türkiye için yüksek tanınırlık ve zengin ulaşım olanakları		0.09	0.04
Uzak pazarlar için cazip bir alternatif olması		0.04	0.02
İç turizmdeki hareketlilik		0.02	0.01
Turizm çeşitliliğini sağlayan coğrafik yapı		0.04	0.02
Yatırımcıların turizme ilgisinin artması		0.02	0.01
Değişiklik gösteren talep yapısına uyum sağlayabilme		0.04	0.02
Yaygınlaşan kış turizmi yatırımları		0.09	0.04
Gelişen gençlik, termal ve sağlık turizmi		0.09	0.04
Uygun kıyı yapıları ve rüzgar ile gelişen yat turizmi		0.17	0.07
Zayıf yanlar	0.24		
Hızlı talep artışına karşı destek olan sektörlerin ve altyapının yanıt verememesi		0.15	0.04
Değerlendirilemeyen yenilenebilir enerji potansiyeli		0.03	0.01
Çevre ve yerel mimariyle uyumsuz büyük oteller		0.07	0.02
Planlamada yaşanan yetki karmaşıklığı		0.03	0.01
Dengeli olmayan marina, liman dağılımı ve belgelendirme sorunları		0.03	0.01
Farklı standartlar içeren turizm belgelerinin varlığı ve bunların uyumlaştırılmaması		0.01	0.00
Yeterince korunmayan tarihi ve doğal miraslar		0.15	0.04
Eşgüdümlü olarak kullanılmayan pazarlama ve tanıtım kaynakları		0.07	0.02
Etkin kullanılmayan sosyal medya		0.15	0.04
Yetersiz mesleki belgelendirme		0.01	0.00
Yetersiz çevre bilinci		0.03	0.01
Anlaşılamayan kentsel peyzaj kavramı		0.03	0.01
Katı atık geri dönüşümünün kıyı kesimlerinde yetersiz oluşu		0.07	0.02
İşlerlik kazanamamış Ulusal Turizm Konseyi ve illerdeki Turizm Konseyleri		0.03	0.01
Farklı karar vericilerdeki kaynaklar ile turizmin bütüncül olarak geliştirilememesi		0.07	0.02
Karar mekanizmalarına yeterince katılmayan yerel halk ve yetkililer		0.07	0.02
Fırsatlar	0.24		
Önemi artan Avrasya ve Körfez ülkeleri ile ilişkiler		0.02	0.00
Dünyada artan turizm ilgisi		0.07	0.02
Artan Doğu Akdeniz ilgisi		0.03	0.00
Artan bilinçli turist sayısı		0.07	0.02
Ulaşım olanaklarındaki gelişme ile artan uzun mesafeli seyahatler		0.13	0.03
İç turizmde ucuz havayolu olanakları		0.07	0.02
Uzman seyahat organizatörlerinin varlığı		0.13	0.03
Bilgi ve iletişim teknolojilerindeki gelişmeler		0.07	0.02
Karadeniz’de başlayan kruvaziyer turizmi		0.07	0.02
Dünya’da artan Türkiye ilgisi		0.03	0.00
Artan kongre turizmi yatırımları		0.07	0.02
Bazı ülkeler ile vizenin kaldırılması		0.13	0.03
Kültür ve sanat faaliyetleri ile artan tanıtım		0.03	0.01
Bölgesel kalkınmanın ulusal ve uluslararası fonlu projelerle desteklenmesi		0.02	0.00
Büyük spor etkinlikleri düzenleme imkanları		0.03	0.00
Yüksek sosyal medya kullanımı		0.03	0.00
Tehditler	0.07		
Olumsuz medya yayınları		0.05	0.00
Türkiye’nin jeopolitik konumundan kaynaklı dış tehditler		0.21	0.01
Fiyatların uluslararası seyahat organizatörlerince tek taraflı olarak belirlenmesi		0.05	0.00
Yavaş ilerleyen Avrupa Birliği katılım süreci		0.10	0.01
Rakip ülkelerin gelişen rekabet gücü		0.05	0.00
Değişen iklim koşulları ve küresel ısınma		0.03	0.00
Açık denizlerin gemi atıkları ile kirlenmesi ve zarar gören kıyı turizmi		0.05	0.00
Bölgesel güvenlik problemleri		0.21	0.01
Koruma-kullanma dengesinin kıyı bölgelerdeki yoğun kullanım ile bozulması		0.10	0.01
Doğu Akdeniz’de plansız artan marina sayısı		0.05	0.00
Çarpık yapılaşma		0.10	0.01

Tablo 19. Strateji seçim problemi için süpermatris (Supermatrix of strategy selection problem)

	AMAC					KRİTERLER				ALTERNATİF STRATEJİLER			
	Strateji seçimi	Güçlü yanlar	Zayıf yanlar	Fırsatlar	Tehditler	Strateji 1	Strateji 2	Strateji 3	Strateji 4	Strateji 1	Strateji 2	Strateji 3	Strateji 4
Strateji seçimi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Güçlü yanlar	0.45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zayıf yanlar	0.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fırsatlar	0.24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tehditler	0.07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strateji 1	0	0.33	0.28	0.18	0.17	1	0	0	0	0	0	0	0
Strateji 2	0	0.28	0.15	0.23	0.12	0	1	0	0	0	0	0	0
Strateji 3	0	0.24	0.17	0.39	0.28	0	0	1	0	0	1	0	0
Strateji 4	0	0.15	0.40	0.20	0.43	0	0	0	0	0	0	1	1

	AMAC					KRİTERLER				ALTERNATİF STRATEJİLER			
	Strateji seçimi	Güçlü yanlar	Zayıf yanlar	Fırsatlar	Tehditler	Strateji 1	Strateji 2	Strateji 3	Strateji 4	Strateji 1	Strateji 2	Strateji 3	Strateji 4
Strateji seçimi	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Güçlü yanlar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Zayıf yanlar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Fırsatlar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tehditler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Strateji 1	<b>0.27</b>	0.33	0.28	0.18	0.17	1	0	0	0	0	0	0	0
Strateji 2	0.23	0.28	0.15	0.23	0.12	0	1	0	0	0	0	0	0
Strateji 3	0.25	0.24	0.17	0.39	0.28	0	0	1	0	0	1	0	0
Strateji 4	0.25	0.15	0.40	0.20	0.43	0	0	0	0	0	0	1	1

Tablo 19'a göre Bölüm 4.2'de algoritma adımları ile yürütülen bulanık ANP yöntemi ile de Strateji 1'in en uygun strateji olduğu ve çözümün çevreci bir yaklaşımla yeşil büyüme temelinde turizm yatırımlarını gerçekleştirmek olduğu ortaya konur.

### 4.3. İki çözümün karşılaştırılması (The comparison of two solutions)

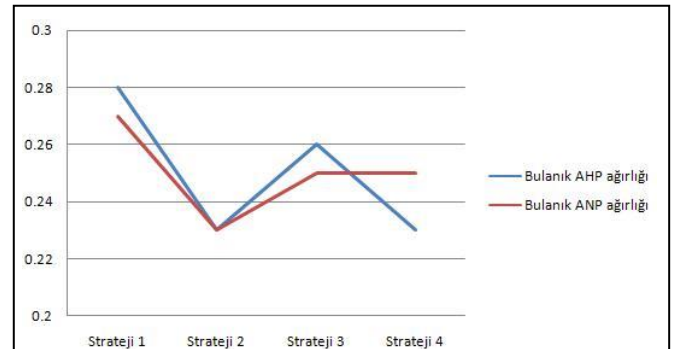
Türkiye'deki turizm sektörü için uygulanabilecek alternatif stratejilerin belirlenmesi çalışmasının çözüm aşamasında elde edilen sonuçlar Tablo 20'deki gibidir. Buna göre problemin ilk çözüm aşamasında kullanılan bulanık AHP yöntemi ile stratejiler 1-3-2-4 olarak sıralanırken, ikinci çözüm aşamasında kullanılan bulanık ANP yöntemi ile ise 1-3-4-2 olarak sıralanmıştır.

Her iki yöntemle de elde edilen sonuçlara göre turizm yatırımlarını çevreci bir yaklaşımla yeşil büyüme temelinde turizm yatırımlarını gerçekleştirmek uygulanabilecek en uygun strateji iken ikinci sırada ise uluslararası turizm pazarı için tanıtıma ve uluslararası işbirliğine önem vermek stratejisi bulunmaktadır.

Tablo 20. Turizm sektöründe strateji seçimi için önerilen iki çözümün karşılaştırılması (The comparison of two proposed solutions for strategy selection in tourism sector)

	Str. 1	Str. 2	Str. 3	Str. 4
AHP ağırlıkları	0.28	0.23	0.26	0.23
AHP sıralaması	<b>1</b>	3	2	3
ANP ağırlıkları	0.27	0.23	0.25	0.25
ANP sıralaması	<b>1</b>	3	2	2

Turizm sektöründe strateji seçimi için önerilen bulanık AHP ve bulanık ANP yöntemleri ile elde edilen strateji ağırlıklarının grafiksel gösterimi Şekil 3'de bulunmaktadır.



Şekil 3. Turizm sektöründe strateji seçimi için önerilen iki yöntemle hesaplanan ağırlıklar (The calculated weights of two methods for strategy selection in tourism sector)

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

Turizm sektörü Türkiye gibi doğal ve tarihi zenginlikleri bünyesinde barındıran stratejik konumdaki bir ülkenin ekonomik anlamda büyümesini sağlayacak önemli kaynaklarından biri olma özelliğini korumakta olup halen geliştirilebilecek bir yapıdadır. Türkiye gibi büyük turizm potansiyeli olan ve bu sektörden gelir elde ederek ekonomisi açısından büyük bir girdi sağlanabilmesi için uygulanabilecek stratejiler bu çalışma kapsamında ele alınmıştır. Çalışmada, sektörün güçlü ve zayıf yönleri ile sektör için fırsat ve tehdit olabilecek durumları gösteren T.C.



Kalkınma Bakanlığı'na bağlı olarak hazırlanan Turizm Özel İhtisas Komisyonu Raporu'nda oluşturulan SWOT analizi temelli hiyerarşik yapıda bir model kurulmuş ve sektör için en uygun gelişim stratejisinin seçimi bulanık mantık çerçevesinde AHP ve ANP yöntemleri ile çözümlenmiş, her iki yöntemle elde edilen çözümler de karşılaştırılmıştır.

SWOT analizi çerçevesinde oluşturulmuş çalışmanın model yapısı ile entegre edilen bulanık AHP ve bulanık ANP çözüm yöntemleri ile Türkiye turizm sektörü için en uygun strateji turizm yatırımlarını çevreci bir yaklaşımla yeşil büyüme temelinde gerçekleştirmek en önemli strateji olarak belirlenmiş olup çevre ve ekolojik yaşam ile uyumlu projelerin hayata geçirilmesinin önemine bir kez daha dikkat çekilmiştir. Stratejiler arasında doğanın ve doğal yaşamın korunması hem ülkenin turizm açısından özelliklerinin korunması hem de sürdürülebilirliğinin artırılması açısından önemlidir.

Bir diğer taraftan özellikle son yıllarda azalan Türkiye'ye giriş yapan yabancı turist dikkatini çekebilmek ve Türkiye'yi tekrar turizm açısından bir cazibe merkezi haline getirmek için de gerekli tanıtım stratejilerinin hayata geçirilmesi ve bu noktada yabancı paydaşlarla yapılacak işbirliği ve proje çalışmalarının artırılmasının önemi de yadsınamayacak boyuttadır. Çalışmada, ülke içerisinde keşfedilmemiş bölgelere, kalkınmadan paylarını alabilmeleri için yöneltilecek yatırım faaliyetlerin artırılması ve bu faaliyetlerin kesintisiz olarak tüm yıl boyunca sürdürülmesi ve başta İstanbul olmak üzere turizm açısından önemli olan tüm bölgelerdeki ulaşım ve alt yapı sorunlarının kalıcı olarak çözülmesi ve kontrolünün sağlanmasının da altı çizilerek aslında turizm sektörüyle ilgili tüm stratejilerin yaklaşık olarak benzer önem ve titizlikle eş zamanlı olarak gerçekleştirilmesi gerektiği çok açıktır.

Türkiye turizm sektörü için strateji seçimine örnek olan bu çalışma sektörel anlamda bünyesinde bulundurduğu çözüm teknikleri açısından ilk olma özelliğini taşıırken gelecekte yapılabilecek strateji seçimi ve çözüm yöntemi geliştirme çalışmalarına da ışık tutma niteliğindedir.



#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

[1] B. Zengin, "Turizm sektörünün Türkiye ekonomisine reel ve moneter etkileri",

*Akademik İncelemeler Dergisi*, Cilt 5, Sayı 1, 102-126, 2010.

- [2] O. Taylan, D. Kaya ve A. Demirbaş, "An integrated multi attribute decision model for energy efficiency processes in petrochemical industry applying fuzzy set theory", *Energy Conversion and Management*, Vol.117, 501-512, 2016.
- [3] C. Prakash ve M.K. Barua, "Integration of AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.37, Part 3, 599-615, 2015.
- [4] G. Büyüközkan ve G. Çifçi, "A combined fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS based strategic analysis of electronic service quality in healthcare industry", *Expert Systems with Applications*, Vol.39, Issue 3, 2341-2354, 2012.
- [5] S.H. Zyoud, L.G. Kaufmann, H. Shaheen, S. Samhan ve D. Fuchs-Hanusch, "A framework for water loss management in developing countries under fuzzy environment: Integration of fuzzy AHP with fuzzy TOPSIS", *Expert Systems with Applications*, Vol. 61, 86-105, 2016.
- [6] O.Y. Mosadeghi, J. Warnken, R. Tomlinson ve H. Mirfenderesk, "Comparison of fuzzy-AHP and AHP in a spatial multi-criteria decision making model for urban land-use planning", *Computers, Environment and Urban Systems*, Vol.49, 54-65, 2015.
- [7] A. Kumar, R. Shankar ve R.M. Debnath, "Analyzing customer preference and measuring relative efficiency in telecom sector: A hybrid fuzzy AHP/DEA study", *Telematics and Informatics*, Vol.32, Issue 3, 447-462, 2015.
- [8] R.J. Kuo, C.W. Hsueh ve Y.L. Chen, "Integration of fuzzy ANP and fuzzy TOPSIS for evaluating carbon performance of suppliers", *International Journal of Environmental Science and Technology*, Vol.12, Issue 12, 3863-3876, 2015.
- [9] J. Ignatius, A. Rahman, M. Yazdani, J. Saparauskas ve S.H. Haron, "An integrated fuzzy ANP-QFD approach for green building assessment", *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol.22, Issue 4, 551-563, 2016.
- [10] D. Gupta ve R. Narain, "A fuzzy ANP based approach in the selection of the best e-business strategy and to assess the impact of

- e-procurement on organizational performance”, *Information Technology and Management*, Vol.16, Issue 4, 339-349, 2015.
- [11] B. Chang, C. Kuo, C.H. Wu ve G.H. Tzeng, “Using fuzzy analytic network process to assess the risks in enterprise resource planning system implementation”, *Applied Soft Computing*, Vol.28, 196-207, 2015.
- [12] P. Aragonés-Beltrán, F. Chaparro-González, J.P. Pastor-Ferrando ve A. Pla-Rubio, “An AHP (Analytic Hierarchy Process)/ANP (Analytic Network Process) based multi-criteria decision approach for the selection of solar-thermal power plant investment projects”, *Energy*, Vol.66, 222-238, 2014.
- [13] G.N. Yücenur, N.Ç. Demirel ve T. Demirel, “Türkiye ekonomisinde stratejik politika seçimi için SWOT analizi ile entegre edilmiş bulanık AHP/bulanık ANP”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi Sigma* 28, 275-286, 2010.
- [14] G.N. Yücenur, Ö. Vayvay ve N.Ç. Demirel, “Supplier selection problem in global supply chains by AHP and ANP approaches under fuzzy environment”, *International Journal of Manufacturing Technology*, 56, 823-833, 2011.
- [15] N. Ömürbek ve Z. Tunca, “Analitik Hiyerarşi Süreci ve Analitik Ağ Süreci yöntemlerinde grup kararı verilmesi aşamasına ilişkin bir örnek uygulama”, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, Cilt 18, Sayı 3, 47-70, 2013.
- [16] M. Soyak, “Uluslararası turizmde son eğilimler ve Türkiye’de turizm politikalarının evrimi”, *Marmara Sosyal Araştırmalar Derneği*, Sayı 4, ISSN 2146-6017, 2013.
- [17] O. Çoban ve C.C. Özcan, “Türkiye’de turizm gelirleri-ekonomik büyüme ilişkisi: Nedensellik analizi (1963-2010)”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 8(1), 243-261, 2013.
- [18] Türkiye Seyahat Acenteleri Birliği, [www.tursab.org.tr/tr/turizm-verileri-istatistikler/turizmin-ekonomideki-yeri/gsmh-icindeki-payi-1963-\\_79.html](http://www.tursab.org.tr/tr/turizm-verileri-istatistikler/turizmin-ekonomideki-yeri/gsmh-icindeki-payi-1963-_79.html). Erişim tarihi: 26.05.2016.
- [19] C. Aktaş, “Türkiye’nin turizm gelirini etkileyen değişkenler için en uygun regresyon denkleminin belirlenmesi”, *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 6(2), 163-174, 2005.
- [20] M.Ö. Yanardağ ve M. Avcı, “Turizm sektöründe istihdam sorunları: Marmaris, Fethiye, Bodrum ilçeleri üzerine ampirik bir inceleme”, *Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi*, Cilt 3, Sayı 2, 39-62, 2012.
- [21] Turizm Data Bank Turizm Veri Bankası, [www.turizmdatabank.com/turizm-istatistikleri/turkiye-ye-gelen-turist-sayisi-ocak-mart-2016](http://www.turizmdatabank.com/turizm-istatistikleri/turkiye-ye-gelen-turist-sayisi-ocak-mart-2016). Erişim tarihi: 26.05.2016.
- [22] O. Kara, İ. Çömlekçi ve V. Kaya, “Turizm gelirlerinin çeşitli macro ekonomik göstergeler ile ilişkisi: Türkiye örneği (1992-2011)”, *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, Cilt 8, Yıl 8, Sayı 1, 8:75-100, 2012.
- [23] T.C. Kalkınma Bakanlığı Onuncu Kalkınma Planı 2014-2018 Turizm Özel İhtisas Komisyonu Raporu, (2014). [www.kalinma.gov.tr/Lists/zel%20ihtisas%20Komisyonu%20Raporlar/Attachments/233/TURİZM%20ÖİK.pdf](http://www.kalinma.gov.tr/Lists/zel%20ihtisas%20Komisyonu%20Raporlar/Attachments/233/TURİZM%20ÖİK.pdf). Erişim tarihi: 24.04.2016.
- [24] T.C. Kalkınma Bakanlığı Onuncu Kalkınma Planı 2014-2018, (2013). [www.kalkinma.gov.tr/Lists/Kalkinma%20Planlar/Attachments/12/Onuncu%20Kalkinma%20Planı.pdf](http://www.kalkinma.gov.tr/Lists/Kalkinma%20Planlar/Attachments/12/Onuncu%20Kalkinma%20Planı.pdf). Erişim tarihi: 24.04.2016.
- [25] M.L. Demircan, E. Tolga ve C. Kahraman, “Bulanık Yenileme Analizi ve AHS yardımı ile çok ölçütlü işletim sistemi seçimi”, *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, Cilt 5, Sayı 1, Kısım 2, 205-216, 2006.
- [26] H. Güner ve Ö. Mutlu, “Bulanık AHP ile Tedarikçi Seçim Problemi ve Bir Uygulama”, *V. Ulusal Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, 473-477, 2005.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 23.11.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 08.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.268005	

## Yeni bir yanma odasına sahip benzin motorunda farklı sıkıştırma oranlarının ve ateşleme avanslarının performans ve emisyonlara etkisi.

Abdurrahman Demirci<sup>\*1</sup>, Hüseyin Emre Doğa<sup>2</sup>, Ömer Cihan<sup>3</sup>, Osman Akın Kutlar<sup>4</sup>,  
Rafiq Mehdiyev<sup>5</sup>, Hikmet Arslan<sup>6</sup>

### ÖZ

Günümüzde içten yanmalı motorların (İYM) geleceği hakkında farklı görüşler vardır. İYM' lerin eski bir teknoloji olduğunu söyleyenlere rağmen İYM' ler ile ilgili çok sayıda yeni çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar içerisinde benzin motorları için başlıca araştırma konuları, yakıt tüketiminin azaltılması ve egzoz emisyonlarının iyileştirilmesidir. Bu makalenin başlıca amacı, tek silindri, su soğutmalı, emme manifolduna püskürtmeli, buji ateşlemeli bir motorda, tasarlanmış olan yeni bir yanma odası geometrisi ile motorun farklı hava fazlalık katsayılarında denenmesi ile yüksek lambda değerlerinde çalıştırılmasıdır. Yeni bir yanma odası bu motor için tasarlanmış ve üç farklı sıkıştırma oranında üretilmiştir. Yeni yanma odasından beklenen, motorun daha fakir karışımlarla düzgün olarak çalışmasını mümkün kılmasıdır. Bu sayede özgül yakıt tüketim değeri ve NO emisyonları azalacağı beklenmektedir. Deneysel yedi farklı hava fazlalık katsayısında (1,0; 1,10; 1,20; 1,30; 1,45; 1,60 ve 1,70), üç farklı sıkıştırma oranında (10,5; 12 ve 14), tam yük koşullarında ve 2500 devir/dakika sabit motor hızında gerçekleştirilmiştir. Deneysel yakıt miktarı, ateşleme avansı ve gaz keleşinin konumuna laboratuvarımızda geliştirilen bir elektronik kontrol ünitesi ile kumanda edilmiştir. Motor fakir karışımlarla çalıştığı zaman NO emisyonu azalmaktadır. Bu emisyonlar azaldığı zaman NO gazını dönüştüren ilave donanımlara olan ihtiyaç azalacaktır. Deneysel sonuçlarına göre sıkıştırma oranının artması ve ateşleme avansının azaltılması sonucunda ortalama efektif basınçta hafif bir azalma olurken NO emisyonları büyük oranda azalmıştır. Bununla beraber buji ile ateşlemeli motorlarda uygun yanma odası tasarımı ile fakir karışımlarda (HFK>1,45) çevrimler arası değişimin çok azaldığı ve motorun düzenli bir şekilde çalıştığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Buji ateşlemeli motor, Fakir karışım, Yanma odası geometrisi, Sıkıştırma oranı, NO emisyonu, Özgül yakıt tüketimi.

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, İstanbul – abdemirci@itu.edu.tr

<sup>2</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, İstanbul – edogan@itu.edu.tr

<sup>3</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, İstanbul – ocihan@itu.edu.tr

<sup>4</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, İstanbul – kutlar@itu.edu.tr

<sup>5</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, İstanbul – mehdiyev@itu.edu.tr

<sup>6</sup> İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, İstanbul – arslanh@itu.edu.tr

# The effects of different compression ratios and spark advances on the performance and emissions of a spark ignition engine with a new combustion chamber

## ABSTRACT

Nowadays, there are different ideas about the future of internal combustion engines. Despite the thoughts about internal combustion engines that are old technology, there have been many new researches about internal combustion engines. Reduction of fuel consumption and improving of the exhaust emissions are the main research topics in the spark ignition engines in the present day. The aim of this paper is to examine experimentally the effect of different compression ratios and excess air coefficients with a new designed chamber geometry on the performance and exhaust emissions of a single cylinder, which is water-cooled, port fuel injection and spark ignition engine. A new combustion chamber geometry was designed and three same combustion chamber geometries with different compression ratios were manufactured. It is expected from the combustion chamber shapes to run the engine properly in the lean mixtures. So, the decrease of fuel consumption and the decrease of NO emission are predicted. The experiments were tested at seven different excess air coefficients (1.0; 1.10; 1.20; 1.30; 1.45; 1.60 and 1.70), three different compression ratios (10.5; 12 and 14), different spark advances, wide open throttle (WOT) and the constant speed, 2500 rpm. The amount of fuel, spark advance and throttle condition were electronically controlled using an engine control unit (ECU) which is designed in the our laboratory by us. While the engine was running with lean mixtures, NO emissions decreased. When NO emissions are reduced, it will decrease the need for NO catalyst. Experimental results show that increasing of compression ratio and decreasing of spark advance leded to decreasing of NO emissions substantially at nearly mean effective pressure values. In addition, the cycle-to-cycle variations are reduced at the lean mixtures (EAC>1.45) with the suitable combustion chamber geometry on the spark ignition engines and the engine remained stable.

**Keywords:** Spark ignition (SI) engine, Lean mixture, Combustion chamber geometry, Compression ratio, NO emissions, Break specific fuel consumption

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Her geçen gün emisyon standartlarının sıkılaştırılması ile birlikte tüketiciler de araç performanslarının iyileşmesini ve yakıt tüketiminin azalmasını beklemektedirler. Bu nedenle yıllardır bu istekleri ve şartları sağlamak için İYM'lar üzerine araştırmalar devam etmektedir. Motor performansının iyileştirilmesi ve zararlı emisyonların azaltılması için yapılan çalışmalar arasında en ümit verici araştırma konularından birisi motorun fakir karışımlarda çalıştırılmasıdır. Böylece zararlı emisyonların azalması ile birlikte özgül yakıt tüketimi de azalacaktır. Motorun fakir karışımlarda düzgün çalışmasını etkileyen en önemli parametrelerden biri yanma odası geometrisidir [1-7].

Ateşleme anında ve sıkıştırma zamanında yanma odasındaki türbülans seviyesini etkileyen en önemli parametreler, swirl ve tumble akış hareketleridir. Bu akış hareketlerinin daha fazla olması yanma odasındaki türbülans seviyesini arttıracaktır. Türbülans seviyesinin belirli bir

değere kadar artırılmasının yanma üzerinde olumlu etkileri olduğu bilinmektedir. Seksenlerde bu konu üzerine birçok çalışma yapılmışken günümüzde bu konu üzerine yeterince çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu konu günümüz teknolojisi ile araştırılmalıdır.

Buji ile ateşlemeli bir motorda yanma olayını etkileyen yanma odası geometrisi sanki boyutlu bir model kullanılarak Paulos ve Heywood tarafından araştırılmıştır. Farklı yanma odası geometrileri ve farklı buji konumları göz önüne alınarak on farklı yanma odası geometrisi incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda yanma odası geometrisinin yanma süresini önemli bir şekilde etkilediği vurgulanmıştır. Buji konumunun yanma odası geometrisinin kenar kısmından merkezine taşınmasının yanma süresini kısalttığı gözlemlenmiştir. Yanma odası geometrisinin değişmesi yanma süresini kısaltmış, ısı verimi artırmış ve ısı kayıplarını azaltmıştır. Yanma hızı türbülans şiddeti artırılarak, artırıldığında ısı kayıpları artmış ve ısı verim düşmüştür [8].

Bir diğer çalışma da, buji ile ateşlemeli bir motorun fakir karışımlarda çalışması için piston

kafasına swirl tipi bir yanma odası tasarlanmış ve denenmiştir. Deneyler dizel motordan buji ile ateşlemeli motora dönüştürülmüş bir motorda gerçekleştirilmiştir. Araştırmalarda iki farklı yanma odası mukayese edilmiştir. Bu yanma odalarından birisi yaygın olarak kullanılan heron tipi ve diğeri yeni tasarlanan tornado tipi yanma odası geometrileridir. Yanma odası geometrileri farklı sıkıştırma oranlarında test edilmiştir. Tornado yanma odası geometrisinin swirl hareketi oluşturarak motorun daha fakir karışımlarda çalışmasına imkan sağladığı gözlemlenmiştir. Fakir karışımlarda yakıt tüketiminin azaldığı gözlemlenmiştir. Tornado geometrisinin CO ve NOX emisyonlarını da azalttığı tespit edilmiştir. Swirl hareketi sıkıştırma zamanında oluşturulduğundan hacimsel verim aynı kalmıştır [9].

Wolanski ve Mehdiyev çift döngülü yanma odası olarak isimlendirdikleri yeni bir yanma odası tasarlamışlardır. Yanma odası geometrisinin etkisi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çift döngülü yanma odasına sahip motorun çok fakir karışımlarda çalışabildiği gözlemlenmiştir. Motorun fakir karışımlarda çalışmasının karışımın kademeleştirilmesi ile sağlandığı belirtilmiştir. İdeal durumlarda özgül yakıt tüketiminin %10-15 azaldığı ve gücün bütün durumlarda %5-7 arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte yanmamış hidrokarbon (CHX) emisyonları 20-50 ppm değerlerini aşmamış ve CO emisyonları %0,2-0,3 arasında kalmıştır. Maksimum NOX emisyon değerleri nominal koşullarda 1000-1200 ppm değerlerini aşmamıştır [10].

Diğeri bir çalışma da, bir dizel motorunda çevre için zararlı egzoz emisyonlarından NO emisyonunu azaltmak için dizel motor dolgusuna buhar ve farklı yöntemlerle su ilave edilmiştir. Ayhan tarafından yapılan çalışmada su ve buhar ilavesinin NO emisyonlarını azalttığı gözlemlenmiştir [11].

Farklı bir çalışma da, buji ile ateşlemeli bir motor için farklı sıkıştırma oranları saf metanol ve benzin kullanılarak karşılaştırılmıştır. Deneyler tek silindri bir motorda, stokiyometrik karışım için 8:1, 8,5:1, 9:1 ve 9,5:1 sıkıştırma oranlarında yapılmıştır. Saf metanolün kullanılması durumunda sıkıştırma oranının artması ile özgül yakıt tüketimi azalmış, ortalama efektif basınç ve ısıl verim artmıştır. Zararlı egzoz emisyonları açısından metanolün daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [12].

Ravi ve Porpatham tarafından yapılan çalışmada LPG yakıtı kullanılan buji ile ateşlemeli bir motorda piston geometrisi değiştirilerek squish miktarları değiştirilmiştir. Squish geometrisinin değiştirilmesi ile motorun daha fakir karışım bölgelerinde LPG ile stabil olarak çalışmasını sağlamışlardır. Squish geometrisinin %30 olduğu durumlarda HFK değerinin 1,66 değeri için motor stabil olarak çalışmıştır ve bu koşullarda NO emisyonu %30 civarında azaltılmıştır [13].

Buji ile ateşlemeli motorlarda yakıt tüketiminin azaltılmasının ve motorun stabil çalışmasını sağlamanın yollarından biriside çevrimsel farklılıkların azaltılmasıdır. Pan ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, emme manifolduna püskürtmeli buji ile ateşlemeli bir motorlarda EGR, emme manifoldu basıncı ve sıkıştırma oranının etkisini deneysel ve teorik olarak araştırmışlardır. EGR oranının artması ile yanma olayının kötüleşmesinin bir göstergesi olan çevrimsel farklılıklar artmıştır. Sıkıştırma oranının ve emme manifoldu basıncının artırılması ile çevrimsel farklılıkların azaldığı gözlemlenmiştir [14].

Literatür araştırmasından elde edilen bilgiler ile buji ile ateşlemeli motorlarda kullanılan iki farklı yanma tekniği vardır. Bunlardan birincisi klasik stokiyometrik yanmadır. Bu yanma türünde zararlı egzoz gazı emisyonlarının azaltılması için pahalı ve verimli bir üç yollu katalitik konvektöre ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci yanma türü olan fakir yanma tekniği ise karbon salınımını ve bazı kirleticileri azaltmaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlar stokiyometrik karışım ile fakir karışıma nazaran daha stabil çalışmaktadır. Fakat enerji dönüşüm oranı açısından bakıldığında, fakir karışım ile dönüşüm veriminin daha yüksek olduğu görülmektedir. Motorun çok fakir karışımlar ile çalıştırılması durumunda silindir içerisindeki sıcaklıklar azaldığından NO emisyonları da azalmaktadır. Fakir karışımın önündeki en büyük engellerden birisi motorun düzensiz çalışmasına neden olan yanma gerçekleşmeden kaçırılan çevrimlerdir. Yanma odası geometrisi vb. değişkenler ile bu durum iyileştirilerek motor fakir karışımlar ile daha stabil çalışır hale getirilebilir.

Bu çalışmanın amacı, fazla güç kaybı olmadan motoru yüksek sıkıştırma oranlarında ve fakir karışımlarda çalıştırmak ve böylece güç kayıpsız NO emisyonlarını azaltmaktır. Bunun için yeni bir yanma odası geometrisi tasarlanarak farklı

sıkıştırma oranlarında ve farklı ateşleme avanslarında denenmiştir.

## 2. DENEY DÜZENEĞİ (EXPERIMENTAL SETUP)

Deneyle İstanbul Teknik Üniversitesi'nin motorlar laboratuvarında yapılmıştır. Deneylelerde dizel motordan benzin yakıtı ile çalışabilir hale getirilmiş tek silindri Antor 3LD 450 marka motor kullanılmıştır [15]. Daha detaylı bilgiler Tablo 1'de verilmiştir. Bu motor bir gaz kelebeği ve elektronik kontrol ünitesi ilavesi ile buji ateşlemeli motor haline dönüştürülmüştür. Ateşleme bujisi dizel enjektörünün yerine takılmıştır. Bujinin konumu yanma odasının merkezine çok yakın olacak şekildedir. Bu motor üzerinde yapılan bir yüksek lisans çalışması ile ateşleme ve püskürtme donanımlarına kumanda eden küçük bir kontrol ünitesi tasarlanıp imal edilmiştir. Burada sürücü kart olarak Arduino Mega 2560 kullanılmıştır [16]. Yakıt püskürtme basıncı 1 bar ve yakıt püskürtme açısı emme üst ölü noktasından 5 KMA sonra olacak şekilde seçilmiştir. Ateşleme bobini dolma süresi 5ms'dir. Dizel yakıtlı durumda motor 10 BG (3000 devir/dakika) güç ve 30 N.m (1800 devir/dakika) moment üretmektedir. Antor 3LD 450 motoruna ait pistonlar üzerinde oyuk olmaksızın düz olarak üretilmiştir. Tasarlanan yeni yanma odaları talaşlı imalat yöntemi ile istenen sıkıştırma oranlarına uygun olarak pistonlar üzerine işlenmiştir. Ham piston ve işlenmiş pistona ait resimler Şekil 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Motor özellikleri (Engine Specifications)

Sıkıştırma oranı	10,5:1, 12:1, 14:1
Silindir sayısı	1
Motor hacmi	454 cm <sup>3</sup>
Çap	80 mm
Stroke	85 mm
Biyel kolu uzunluğu	145 mm



Şekil 1. Ham (Solda) ve işlenmiş (sağda) pistonlar (Rough and manufactured pistons)

Motor deneylelerinde eddy-current bir motor freni kullanılmıştır, Dinamometre kuvveti yük hücresi ile ölçülmüştür. Yük sensörünün hassasiyeti  $\pm 0,02\%$ 'dir. Motor devir sayısı indüktif bir hız sensörü ile ölçülmüştür. Yakıt ölçümünde AVL 733S yakıt tüketimi ölçüm sistemi kullanılmıştır. Sistemin hassasiyeti 0,08 kg/h'dir. Egzoz emisyonlarını (CO<sub>2</sub>, THC, HC, CO ve NO) ölçmek için egzoz gazı doğrudan egzoz ölçüm cihazlarına bağlanmıştır. Egzoz gazları ve HFK iki farklı cihaz (Bosch BEA 350 ve Horiba Mexa 7500) kullanılarak ölçülmüş ve hesap edilmiştir. Dinamometreye OTAM tarafından geliştirilen bir yazılım ile kumanda edilmektedir. Bütün bilgiler; egzoz gazı ve yağlama yağı sıcaklığı, gaz kelebeğinin pozisyonu, emme ve egzoz manifoldu basınçları ve diğer birçok sensör bilgisi OTAM yazılımı ile toplanmıştır. Her deney noktasında 90 s süresince bu bilgiler kaydedilmiştir. Deneyleler esnasında soğutma suyu sıcaklığı 72 °C de sabit tutulmuştur. Ayrıca her noktada azami momentin elde edildiği ateşleme avansı değeri tespit edilmiştir. Buna ilave olarak her noktada ateşleme avansı MBT (Maximum Brake Torque for Minimum Spark Advance, En büyük moment için

gerekli minimum ateşleme avansı)'den 2-4 KMA daha az yapılarak değişimler incelenmiştir. MBT'nin elde edilmesi için verilen ateşleme avansı maksimum avans ve maksimum avansın 4 KMA ertelenerek elde edilen avans ise optimum olarak isimlendirilmiştir. Optimum avans, fazla güç düşüşüne neden olmadan NO emisyonlarını azaltmak için denenmiştir. Deney sonuçları özet olarak Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Farklı sıkıştırma oranlarında performans ve emisyon değerlerinin özeti (The summary values of performance and emission values for different compression ratios)

		MR_10,5			MR_12		
$\lambda$		1	1,45	1,60	1	1,45	1,60
NO	ppm	1684	607	257	2290	1063	560
ÖYT	g/kWh	298	264	269	287	260	264
THC	ppmC	4670	2880	3074	2963	2673	3553
HC	ppm	625	325	330	271	285	364
CO	%	1,566	0,060	0,071	0,826	0,064	0,079
OEB	Bar	8,97	7,29	6,56	9,30	7,30	6,62

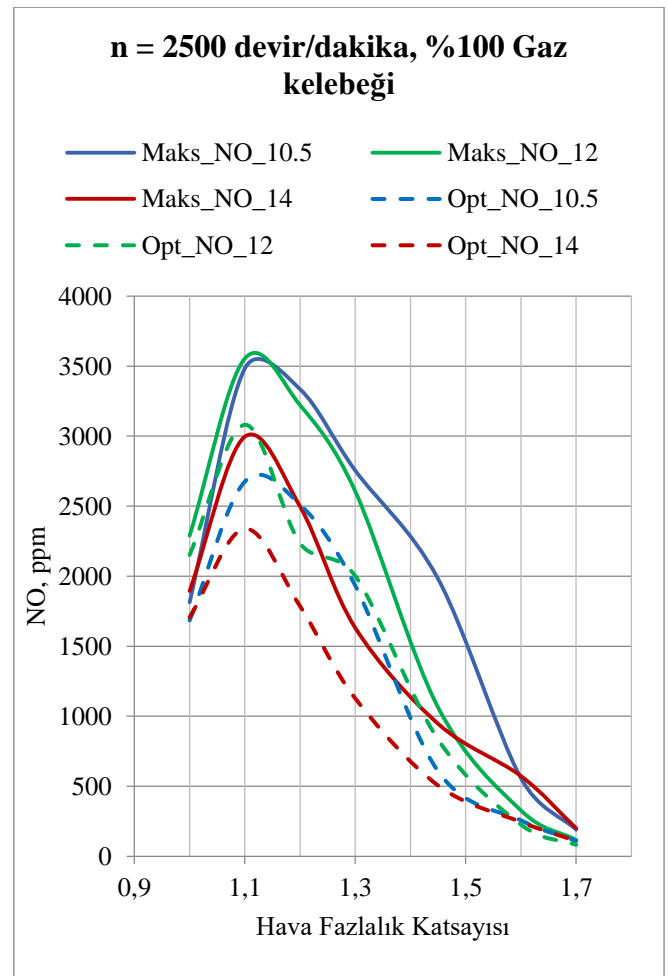
  

		MR_14		
$\lambda$		1	1,45	1,60
NO	ppm	1895	946	573
ÖYT	g/kWh	291	261	263
THC	ppmC	3192	2890	3560
HC	ppm	281	296	348
CO	%	0,945	0,083	0,127
OEB	Bar	9,42	7,31	6,72

### 3. SONUÇLAR (RESULTS)

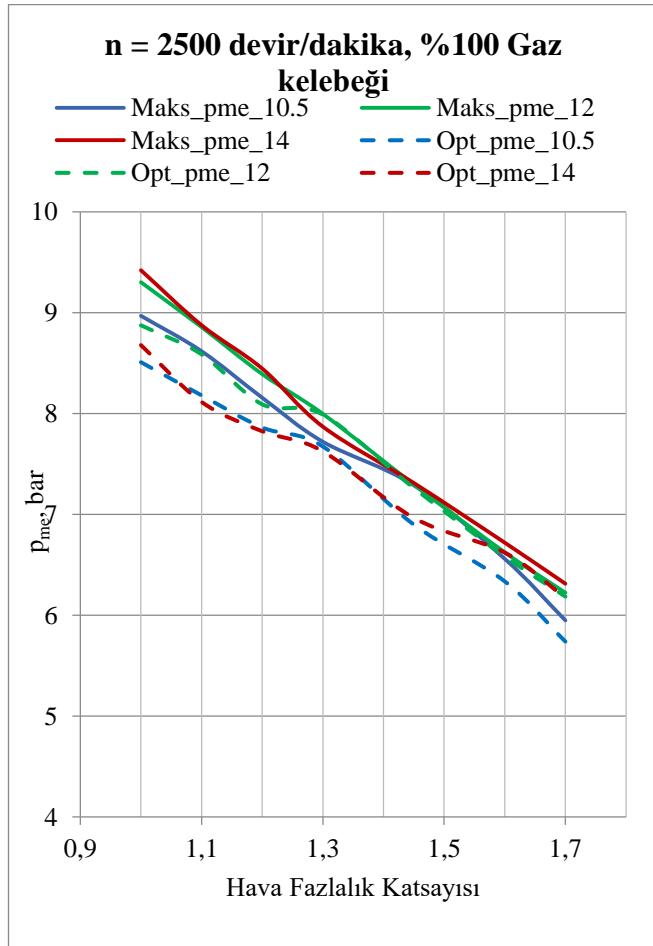
NO emisyonlarının hava fazlalık katsayısı ile değişimi Şekil 2'de verilmiştir. NO emisyonları HFK'nın 1,1 olduğu bölgede en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra HFK'nın artması ile NO emisyonları azalmıştır. Silindir içi sıcaklıkların NO emisyonu üzerinde büyük etkisi vardır. Karışım fakirleştikçe silindir içi sıcaklıklar azalır. Bunun anlamı silindir içindeki gerekli olandan daha fazla olan hava da ısıldığı için silindir içi sıcaklıklar azalmaktadır. Bu sebeple HFK'nın 1,45 değeri stokiometrik koşullar ile karşılaştırıldığında NO emisyonlarının oldukça azaldığı görülür. HFK (hava fazlalık katsayısı) 1,3 değerinden az olduğu zaman MR\_14 ve MR\_12 (kısmen) pistonlarında vuruntu ortaya çıkmıştır. Bu sorunu gidermek için ateşleme avansı azaltılmıştır. Ateşleme avansının azaltılması silindir içerisindeki sıcaklığın düşmesini ve NO emisyonlarının azalmasını sağlamaktadır. Motor HFK 1,7 olduğunda bile düzgün olarak çalışmaktadır. HFK 1,45 den 1,6 değerine

geldiğinde NO emisyonu 1000 den 500 ppm e inmiştir. Fakir bölgede çalışırken ( $\lambda = 1,45$ ) tüm pistonlarda NO emisyonları stokiometrik şartlara göre %50-60 azalmıştır. Motorun 10,5 sıkıştırma oranında stokiometrik karışım ile çalışması yerine yüksek sıkıştırma oranında ( $\epsilon = 14$ )  $\lambda = 1,45$  değeri tercih edildiği zaman NO emisyonlarında %48 azalma olmuştur. Şekilde gösterilen maksimum ve optimum değerleri deneylerde kullanılan maksimum ateşleme avansı değerini ve bu ateşleme avansı değerinin düşürülerek minimum NO emisyonunun elde edilmesi için tercih edilen optimum avans değerini göstermektedir. Bütün hava fazlalık katsayılarında ateşleme avansının azaltılması NO emisyonlarının azalmasına neden olmuştur. MR\_14 pistonu için HFK'nın 1,45 değerinde ateşleme avansının maksimum değerden optimum değere alınması NO emisyonlarını %53 düşürmüştür. Fakat NO emisyonlarındaki değişime bakarak bir sonuca varmak doğru değildir. Bu sebeple OEB ve ÖYT değerlerindeki değişimde göz önünde bulundurulmalıdır.



Şekil 2. Farklı sıkıştırma oranlarında NO emisyonlarının HFK'ya göre değişimi (NO emission for different compression ratios)

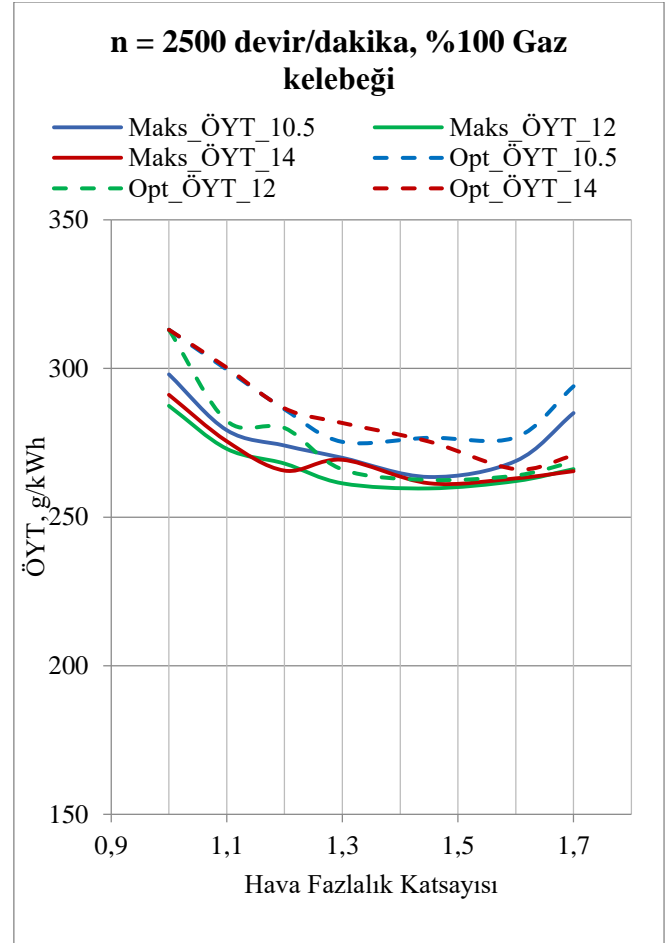
Ortalama efektif basınç (OEB) değerinin HFK'ya göre değişimi Şekil 3'te verilmiştir. Beklenildiği gibi sıkıştırma oranının artması OEB değerini artırmıştır. MR\_14 pistonunda vuruntu sebebiyle ateşleme avansı belli bir değerden sonra artırılmamıştır. Vuruntudan kaçınmak için 4-6 KMA daha az avans verilmiştir. Buna rağmen stokiyometrik şartlarda sıkıştırma oranının 10,5 den 14 e yükseltilmesi OEB değerinin %5 artmasını sağlamıştır. Fakat sıkıştırma oranının 10,5 den 14'e yükselip HFK'nın 1,0'den 1,45'e gelmesi durumunda OEB % 18 azalmaktadır. Bu beklenen bir durumdur çünkü gaz keleşinin tam açık olduğu durumda karışımı fakirleştirmek için daha az yakıt gönderilmektedir. Ateşleme avansının maksimum değerinden optimum değerine değiştirilmesi OEB değerinin düşmesine neden olmuştur. MR\_14 pistonu için karışım fakirleştikçe maksimum ve optimum avanslar için aradaki fark azalmıştır. HFK'nın 1 değerinde OEB azalma miktarı %8,5'dir.



Şekil 3. Ortalama efektif basınç değerinin değişimi (Variation of break mean effective pressure)

Hava fazlalık katsayısının 1,60 değerinde avans değerinin en yüksek değerinden optimum değerine değiştirilmesi durumunda OEB azalması yalnızca %2'dir. Bu şartlarda NO emisyonunun azalması ise %57'dir.

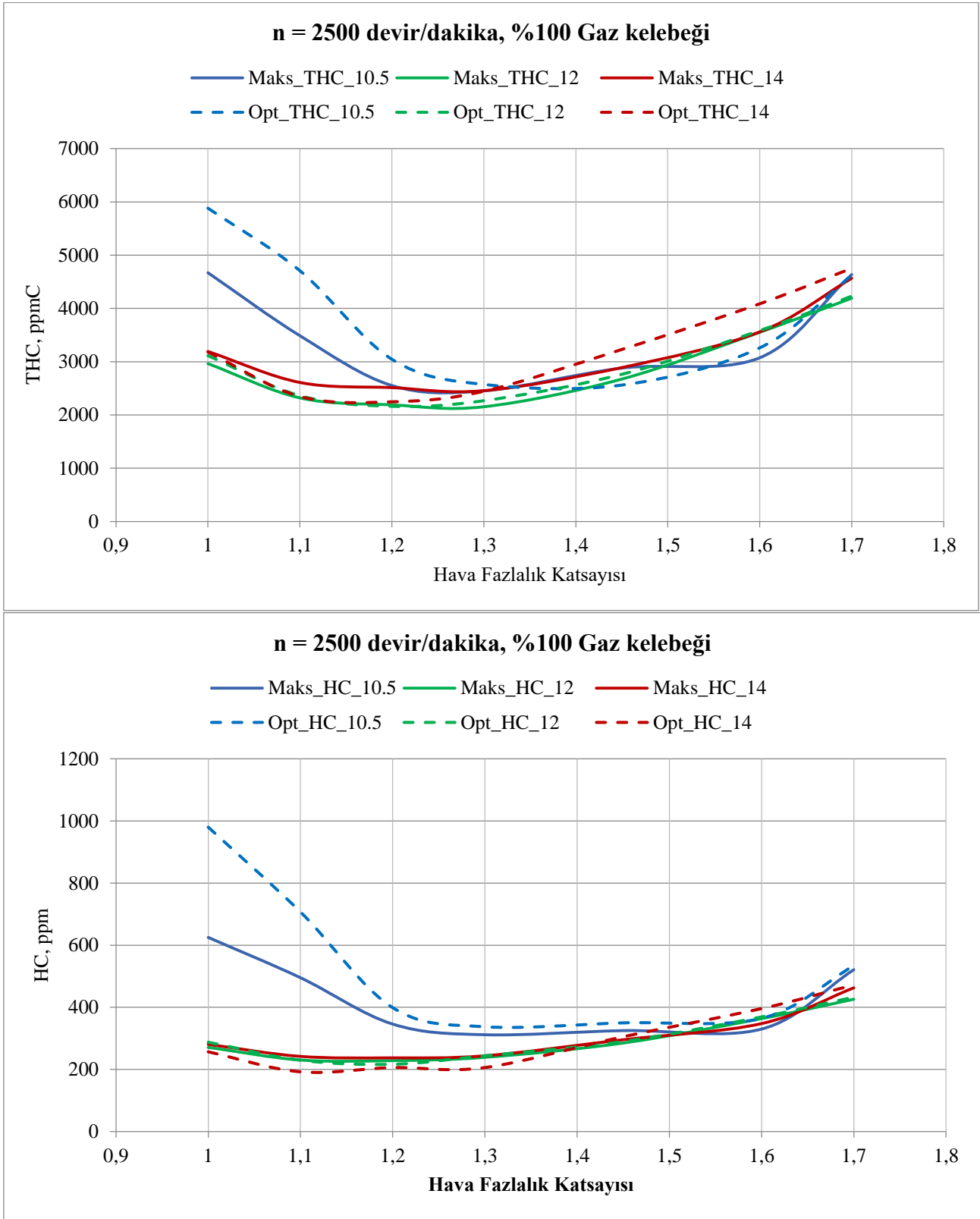
Deney sonuçlarına göre normal sıkıştırma oranında stokiyometrik karışımla ( $\epsilon = 10,5$ ;  $\lambda = 1,0$ ) çalışma yerine yüksek sıkıştırma oranında fakir karışımla ( $\epsilon = 14$ ;  $\lambda = 1,45$ ) çalışma durumunda ortalama efektif basınçtaki azalma tam olarak karşılanamamıştır. Fakat orijinal dizel motor ile mukayese yapılırsa aynı OEB değerleri elde edilmiştir.



Şekil 4. Farklı sıkıştırma oranlarında ÖYT'nin HFK'ya göre değişimi (Variation of BSFC according to excess air coefficient)

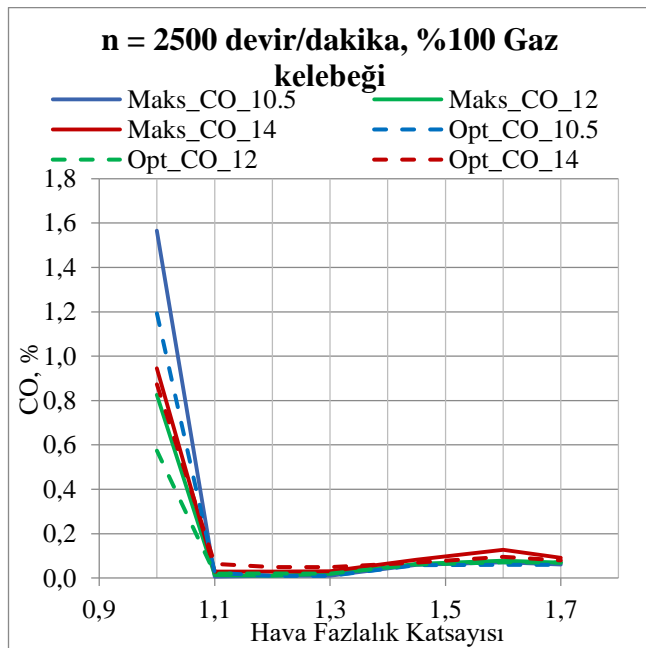
Özgül yakıt tüketimi (ÖYT) sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Stokiyometrik şartlarda MR\_14 pistonu %2,5 daha az yakıt tüketmektedir. En düşük ÖYT değeri MR\_12 pistonu ile elde edilmiştir. Sıkıştırma oranının 10,5 den 14 e yükselip HFK'nın 1,0'den 1,45 gelmesi durumunda ÖYT % 13 azalmaktadır. Ortalama efektif basınçtaki % 18'lik azalma özgül yakıt tüketimindeki %13 lük azalma ile birlikte düşünüldüğü zaman yapılması düşünülen değişikliğin olumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. MR\_14 pistonu için HFK'nın 1 değerinde ateşleme avansının en yüksek değerinden optimuma değiştirilmesi durumunda ÖYT %7 artmıştır.





Şekil 5. Farklı sıkıştırma oranlarında THC (üstte) ve HC emisyonlarının (altta) HFK'ya göre değişimi (Variations of THC (above) and HC (bottom) at different compression ratios according to excess air coefficient)

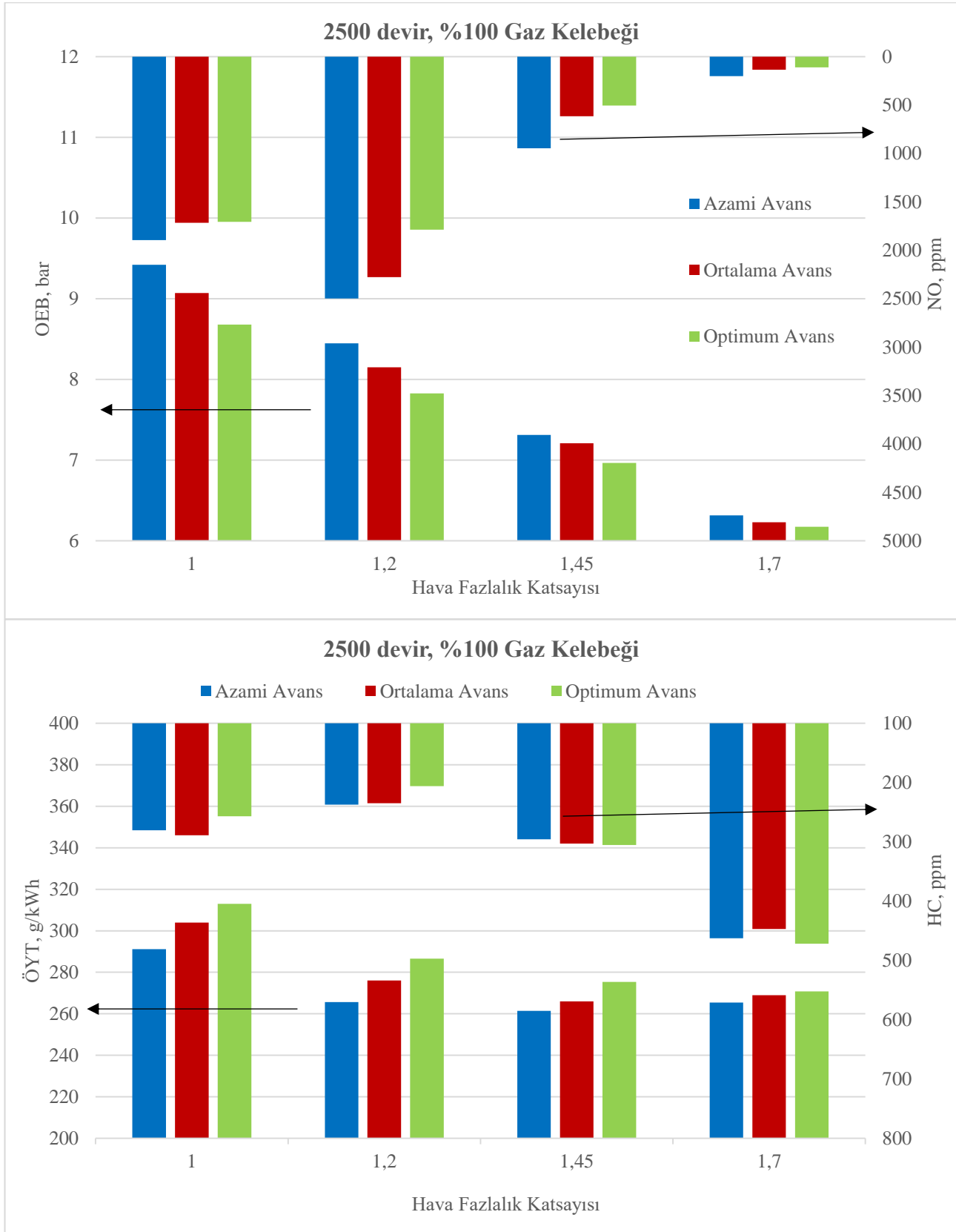
HC emisyonlarını ölçmek için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bosch BEA 350 egzoz gazı ölçüm cihazı nondispersive infrared dedektörüne sahiptir. Bu cihaz ile yapılan ölçümlerde HC emisyonları ppm birimine göre ölçülmüştür. Fakat Horiba 7500 cihazı (alev ionization dedektörü ) kullanır. Bu usulde toplam emisyonlar (THC) ppmC biriminde gösterilir. Deneyler göstermiştir ki ölçüm yöntemi farklılığından dolayı THC emisyonları HC emisyonlarından her zaman çok daha fazla olmuştur. THC ve HC emisyonlarının değişimi Şekil 5’de verilmiştir. MR\_10,5 diğer pistonlar ile karşılaştırıldığı zaman özellikle HFK'nın 1,5 değerine kadar daha yüksek THC emisyonuna sahiptir. Tüm çalışma şartlarında THC emisyonları ile HC emisyonları aynı değişim eğilimini göstermektedir. Her iki emisyonunda MR\_14 ve MR\_12 pistonları benzer THC emisyon değerine sahiptir. En düşük THC emisyonu HFK'nın 1,3 değerinde elde edilmiştir. Eğer 10,5 sıkıştırma oranında HFK = 1,0 şartları ile 14 sıkıştırma oranı HFK = 1,45 durumlarını karşılaştırırsak %20 oranında THC emisyonlarında azalma sağlanmıştır. Fakat  $\lambda = 1,6$  olduğumda stokiyometrik şartlara göre THC emisyonlarında %12 artış olmaktadır.



Şekil 6. CO emisyonlarının hava fazlalık katsayısına göre değişimi (Variation of CO emissions according to excess air coefficient)

İçten yanmalı motorlarda CO emisyonları genellikle HFK'nın değerine bağlıdır [17]. Deneylerde elde edilen sonuçları göre CO emisyonunun değişimi Şekil 6 da verilmiştir.  $\lambda = 1,0$  değerinde oldukça yüksek CO değerleri olmasına rağmen  $\lambda = 1,1$  değerinden sonra önemli derecede azalmalar görülmektedir. HFK'nın artışı ile CO emisyonları azalmaktadır fakat bu etki  $\lambda > 1,45$  değerinden sonra hafif bir yükselme olmuştur. CO emisyonlarının HFK ya bağlı olarak değişimi THC emisyonları ile benzerdir. Ateşleme avansının ertelenmesi, HFK'nın 1 değerinde CO emisyonları bütün sıkıştırma oranlarında azalmıştır. Diğer hava fazlalık katsayısı değerlerinde ateşleme avansının ertelenmesi CO emisyonlarında ciddi bir değişime neden olmamıştır.

Şekil 7’de OEB, ÖYT, NO ve HC performans ve emisyon parametrelerinin ateşleme avansı ve HFK’ya göre değişimi MR\_14 pistonu için gösterilmiştir. HFK değerinin artması ile ateşleme avansın OEB üzerindeki etkisi azalmıştır. HFK'nın 1 değerinde ateşleme avansının en yüksek değerinden optimum değerine geciktirilmesi OEB’ni %8 azaltmış ve HFK'nın 1,45 değeri için ateşleme avansının geciktirilmesi ise OEB’ni yalnızca %4 azaltmıştır. Aynı grafik üzerinde gösterilen NO emisyonlarının ateşleme avansının geciktirilmesi ile değişimi HFK'nın düşük değerlerinde çok az, yüksek değerlerinde çok fazladır. Stokiyometrik karışım için ateşleme avansı en yüksek değerinden optimum değerine geciktirildiğinde NO emisyonlarındaki azalma %5 iken HFK'nın 1,45 değerinde azalma %47 olmuştur. Motorun HFK'nın 1 değerinde azami avans ile çalıştırmak yerine HFK'nın 1,45 değerinde optimum avans ile çalıştırılması durumunda OEB’de %26 kayıp görülürken NO emisyonlarında %73 iyileşme görülmüştür. Ateşleme avansının geciktirilmesi ÖYT’ni artırmıştır. HC değerleri ise ateşleme avansının değiştirilmesi ile farklı HFK değerlerinde farklı değişimler göstermiştir.



Şekil 7. OEB, ÖYT, NO ve HC değerlerinin ateşleme avansı ve HFK'ya göre değişimi (Variation of PME, BSFC, NO and HC values)

#### 4. DEĞERLENDİRMELER (CONCLUSION)

-Deney sonuçlarına göre  $\lambda = 1,45-1,60$  çalışma şartlarında, stokiyometrik koşula göre NO emisyonları ve ÖYT değeri belirgin şekilde düşmüştür.

- Fakir karışımlar ile çalışma sebebiyle ortaya çıkan ortalama efektif basınç kaybı, sıkıştırma oranının artırılması ile bir miktar karşılanabilir.

- Sıkıştırma oranının 10,5'den 14' e ve HFK'nın 1,0 dan 1,45'e yükseltilmesi durumunda %18 OEB kaybı olmuştur.

- HFK'nın 1,0 dan 1,45'e artırılması durumunda MR\_12 ve MR\_14 pistonlarında NO emisyonları %50-60, THC emisyonlarında da %11 oranında azalma olmuştur.

- Sıkıştırma oranının 10,5 den 14'e ve HFK'nın 1,0 dan 1,45'e yükseltilmesi durumunda özgül yakıt tüketimi değeri %13 azalmıştır.

- MR\_14 pistonunda HFK'nın 1,3 değerinden sonra vuruntu görülmemiştir.

- En düşük özgül yakıt tüketimi değeri  $\lambda = 1,45$  değerinde elde edilmiştir.

-  $\lambda = 1,3$  ile stokiyometrik şartlar karşılaştırıldığı zaman CO emisyonları %90 oranında azalmıştır.

- Sıkıştırma oranı olarak 12 ve 14 değerleri uygun görülmüştür.

- Moment ve güç değerindeki değişim orijinal dizel motoru ile karşılaştırıldığında ihmal edilebilir düzeydedir.

#### TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)


Bu projenin bütçesi İTÜ BAP birimi tarafından sağlanan destekler ile gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yazarlar bu projeyi destekleyen Bosch otomotiv yedek parçaları, Otam, Teknodak Plastik Kalıp ve Makine ve İTÜ otomotiv laboratuvarı çalışanlarına teşekkürlerini sunarlar.

#### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] J. B. Heywood, *Internal combustion engines*. Newyork, McGraw-Hill, 1988.
- [2] B. Safgönül, M. Ergeneman , H. E. Arslan ve C. Soruşbay, *İçten yanmalı motorlar*. İstanbul, Birsen Yayınevi, 2006.
- [3] W. W. Pulkrabek, *Engineering fundamentals of the internal combustion engines*. USA, Pearson Prentice Hall, 2004.
- [4] H. Zefaan. (2011, September). Combustion chamber geometry effects in spark ignition engine exhaust emissions. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 10(1). pp. 29-40.
- [5] H. E. Doğan, *LPG dönüşümü yapılmış bir dizel motorunda azot oksit oluşumunun teorik ve deneysel olarak incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [6] C. Dinç, H. Arslan and R. Mehdiyev. (2008, May). CO<sub>2</sub> Emission Reduction Using Stratified Charge in Spark-Ignition Engines, *Energy & Fuels*, 23. pp. 1781-1786.
- [7] Ü. Demir, Ö. M. Göbeloğlu, H. S. Soyhan ve E. Büyükkaya. (2014, Ekim). Bir HCCI motorun 0-boyutlu yanma analizi. *SAÜ Fen Bil Der*, 19(2). pp. 203-211.
- [8] S. G. Paulos and J. B. Heywood. The effect of chamber geometry of a spark-ignition engine combustion. *SAE Technical Paper Series*, 830334, 1983.
- [9] K. S. Hershleb, L. Lorenzen ve E. Kofoed. Lean Combustion in a High Compression Four Stroke Gasoline Engine, *SAE Technical Paper Series*, 810786, 1983.
- [10] P. Wolanski and R. Mehdiyev, Bi-Modal combustion chamber for a stratified charge engine. *SAE Technical Paper Series*, 2000-01-0196, 2000.
- [11] M. K. Balki ve C. Sayın. Saf metanolün kullanıldığı buji ateşlemeli bir motorda sıkıştırma oranının performans, yanma karakteristiği ve emisyonlar üzerine etkisi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12(3). pp. 73-85, 2015.
- [12] V. Ayhan. (2016, Haziran) Direkt enjeksiyonlu bir dizel motoruna buhar ve farklı yöntemlerle su gönderiminin performans ve NO<sub>x</sub> emisyonlarına etkilerinin incelenmesi. *SAÜ Fen Bil Der*. 20(3). pp. 463-471.
- [13] K. Ravi ve E. Porpatham. (2017, Ocak). Effect of piston geometry on performance and emission characteristics of an LPG fuelled lean burn SI engine at full throttle

condition. *Applied Thermal Engineering*, 110(2017). pp. 1051-1060.

- [14] M. Pan, G. Shu, H. Wei, T. Zhu, Y. Liang ve C. Liu. (2013, Ekim) Effects of EGR, compression ratio and boost pressure on cyclic variation of PFI gasoline engine at WOT operation, *Applied Thermal Engineering*, 64(2014). pp. 491-498.
- [15] O. A. Kutlar, *Dört zamanlı otto (rochas) çevrimli motorlarda kısmi yükte yakıt tüketimini azaltmak için yeni bir yöntem (periyot atlatmalı motor)*, Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999.
- [16] Ö. Tekeli, *Çevrim Atlatmalı Bir Benzin Motorunun Ateşleme ve Püskürtme Ünitelerinin Tasarımı ve Üretimi*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2013.
- [17] J. A. Harrington and R. C. Shishu. A single-cylinder engine study of the effects of fuel type, fuel stoichiometry, and hydrogen-to-carbon ratio on CO, NO, and HC exhaust emissions, *SAE Technical Paper Series*, 730476, 1973.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 07.04.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 09.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.304492	

## Elektrodiyaliz proseslerinden kaynaklanan konsantre akımın minimizasyonu ve yeniden kullanılabilirliğinin incelenmesi: Tekstil atıksuyu örneği

Fatih İLHAN\*<sup>1</sup>

### ÖZ

Membran prosesler hem içme suyu arıtımında hem de atıksu arıtımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu arıtım yöntemi en genel anlamda arıtmadan ziyade bir ayırma prosesidir. Yalnız bu arada da konsantre oluşumunun önüne geçmek mümkün olmamaktadır. Bu nedenden ötürü en büyük problem olarak membran proseslerden kaynaklanan konsantre kısmın arıtımı için de ekstra çaba sarf edilmektedir. Bu durumda yeni membran proseslerin kullanımına ve yeni çalışma metodlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle ilk olarak klasik elektrodiyaliz (KED) prosesi ile çalışılmıştır. Bu proseste oluşan konsantre akım oranı %10 (1L atıksu /0,1 L konsantre kısım), konsantre akım tekrar tekrar kullanılarak 15 L atıksu arıtımı gerçekleştirilmiş ve konsantre akım %0,67 oranına kadar indirgenebilmiştir. Benzer şekilde bipolar membranlı elektrodiyaliz (BMED) prosesinde de anolit ve katolit olarak 0,1L başlangıç çözeltisi konulduğunda tekrarlı arıtım sonucunda konsantre akım (20 L atıksu, 0,1 L anolit, 0,1 L katolit olup) %1 seviyelerine kadar indirgenebilmiştir. Bu çalışmada konsantre akımın elektrodiyaliz proseslerinde tekrar tekrar kullanılabilirliği ve minimize edilebileceği görülmüştür. Aynı zamanda BMED prosesi ile PH değeri 0,32 M H<sup>+</sup> ve 0,38 M OH<sup>-</sup> değerine sahip karışık asidik ve alkali çözeltiler elde edilmiştir. Başlangıç değerlerine bakıldığında 47,5 kat (0,38/0,008) ve (0,32/0,009) 35,6 kat daha yoğun alkali ve asidik çözeltiler elde edilebilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Membran Prosesler, elektrodiyaliz, konsantre akım, bipolar membran elektrodiyaliz, ast-baz ger, kazanımı

## Investigation of minimization and reusability of the reject from electrodiyalisis processes: an example textile wastewater

### ABSTRACT

Membrane processes are widely used in both drinking water treatment and wastewater treatment. This method is separation process, in the most general sense, rather than treatment. In the meantime, it is not possible to avoid reject formation. For this reason, the biggest problem is the extra effort required to remove the reject from the membrane processes. In this case, the use of new membrane processes and new operation methods are needed. For this reason, at the first stage, textile wastewater were treated by classical electrodiyalisis (CED) process. 10% (1 L wastewater / 0.1 L rejected portion) of the concentrate stream was generated from this process. Utilizing the reject, 15 L of wastewater treatment was realized. At this point, the concentrate stream can be reduced to 0.67%. Likewise, in the bipolar membrane electrodiyalisis (BMED) process, when the initial solution of anolite and catholyte was placed as a 0.1L initial solution, the reject flow (20 L wastewater, 0.1 L anolite, 0.1 L catholyte) could be reduced to 1%. In this study, it was observed that the reject stream could be used repeatedly and minimized in the electrodiyalisis processes. At the same time, mixed acidic and alkaline solutions with pH value of 0,32 M H<sup>+</sup> and 0,38 M OH<sup>-</sup> value were obtained by BMED process. According to the initial values, 47.5 times (0.38 / 0.008) and (0.32 / 0.009) 35.6 times more concentrated alkaine and acidic solutions were obtained

**Keywords:** Membrane processes, electrodiyalisis, reject, bipolar membrane electrodiyalisis, acid-base recovery

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, İstanbul – [filhan@yildiz.edu.tr](mailto:filhan@yildiz.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Su/Atıksu arıtımında en önemli husus arıtma verimi olarak görülmektedir Oysa bu arıtım sonrası oluşması muhtemel atıkların varlığı önemli bir sorundur. Her ne kadar kimyasal ve biyolojik arıtım ile ilgili çalışmalarda arıtım gerçekleşiyor olsa da özellikle son yıllarda önemli ölçüde kullanımı artan membran prosesler yer almaktadır[1]. Membran prosesler özellikle son 20 yıldır en popüler arıtma yöntemler arasında ilk sıralarda yer alır[2]. Bu prosesin birçok farklı alanda kullanılabilmesi en önemli avantajlarından[3-7]. Yalnız membran prosesler arıtmadan ziyade bir ayırma prosesi olarak çalışmaktadır. Bu da kirleticileri ayrı bir haznede daha yoğun hale getirmektedir. Daha açık ifadeyle, kirleticilerin giderimi yerine farklı bir alanda biriktirilmesi genel prensibi ile çalışmaktadır. Öyle ki bu kirleticilerin yer aldığı konsantre kısım oldukça yoğun bir kirletici içeriğe sahip olduğu için giderim maliyeti de oldukça yüksek olmaktadır[8]. Eğer ki alıcı ortama düşük bir debide de olsa bu yoğun kirleticiler verilirse önemli derecede olumsuzluklar ile karşılaşılması olasıdır[9]. Bu nedenle çeşitli konfigürasyonlar ile membran biyoreaktör (MBR) arıtım prosesi geliştirilmiştir[10]. Yalnız bu çalışmalarda da konsantre kısım oluşumu engellenememiştir. Bu nedenle membran proseslerin yanına bir de konsantre atıksu arıtma prosesleri ilave edilmektedir. Nitekim genel debiye oranla daha düşük olsa da önemli ölçüde kirleticiye sahiptir. Bu konsantre akımın belirlendiği çalışmalar dikkate alındığında klasik membran proseslerinde (Mikrofiltrasyon : MF, Ultrafiltrasyon : UF , Nanofiltrasyon : NF, Ters Osmoz : TO) %10-45 oranında bir konsantre akım oluştuğu görülmektedir[11-13].

Konsantre akımın yönetimi uzun yıllardır tekrar tesise verilmesi yoluyla gerçekleştirilmeye çalışılmaktadır[14]. Bu durumda kirletici parametreler tesise giren atıksuda bulunan kirleticilerin tekrar sisteme verilmesi anlamını taşımaktadır. Bu da bir süre sonra tesisin tasarım parametresi üstünde kirletici gelmesine ve tesisin

giderek işlevini yitirmeye başlar hale gelmesine yol açmaktadır[15]. Bu nedenlerden ötürü ya konsantre akımın daha etkin bir biçimde yönetiminin sağlanması gerekliliği görülmüştür. Kısacası bu konsantre akım ya oldukça yoğun bir hale getirilmeli ya da yeniden kullanılabilir bazı yan ürünlere dönüştürülebilmesi gerekmektedir.

Membran konsantresinin yönetimi ve minimizasyonu ile ilgili çalışmalar özellikle son yıllarda büyük önem taşımaktadır[16]. Ülkemizde de bu alanda çalışmalar artmaktadır ve ülkemizde bu hususta 2017 yılında bir çalıştay da gerçekleştirilmiştir. Bu organizasyonda konsantre akımın membran prosesler içinde en önemli sorunlardan biri olduğu vurgulanmıştır.[17]. Yalnız bu çalıştayda konsantre akımın yönetimi olarak minimizasyon değil arıtımı üzerinde çalışmalar yapıldığı görülmektedir [18-20

Tüm bu nedenlerden ötürü yeni membran proseslerine olan ihtiyaç artmaktadır. Bu nedenle özellikle son yıllarda kullanım alanı bulan ED (Elektrodiyaliz) ve CDI (Kapasitif Deiyonizasyon) prosesleri kullanılmaya başlanmıştır[21]. Nitekim bu proseslerde de %10 mertebelerinde bir konsantre akım oluşumu gözlenmektedir[22]. Özellikle elektrodiyaliz prosesi incelendiğinde klasik elektrodiyaliz (KED) ve bipolar membranlı elektrodiyaliz (BMED) proseslerinde diğer membran proseslerden önemli bir fark olarak membran gözeneklerinden artılmış su değil, kirletici iyonların geçmesidir[23-24]. Bu sayede kirletici iyonlar konsantre diye nitelendirilen bir bölmede toplanır. Bu kirletici hacminin ne kadar küçük hacimde olması kullanıcı tarafından belirleniyor olması konsantre hacmin minimizasyonunu sağlamak açısından önemlidir. Ayrıca kesikli ya da sürekli arıtmada bu hacmin değişmeden kalması da önemi ölçüde minimizasyon sağlayacaktır.

Bu çalışmadaki temel amaç KED prosesinde konsantre hacmin başlangıçta %10 mertebelerinde sabit tutularak bu değer minimizasyondur. Aynı zamanda BMED prosesinde de benzer şekilde konsantre olarak görülen anolit ve katolitlerin de sabit tutularak hem konsantre minimizasyonu hem de elde edilmesi muhtemel asidik ve alkali çözeltilerin yoğunlaştırılmasıdır.

## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIAL AND METHODS)

### 2.1. Analizler (Analyses)

Bu çalışmada kullanılan tüm kimyasallar Merck marka olarak kullanılmıştır. Benzer şekilde tüm analizler de Standart Metotlara bağlı olarak gerçekleştirilmiştir[25]. Aynı zamanda tüm membran çalışmalarında atıksu olarak tekstil atıksuyu(TAS) (AKINAL TEKSTİL A.Ş) kullanılmıştır. 1 L olarak kullanılan numune hacmine ek olarak konsantrasyonunda iletkenliği sağlamak amacıyla KED prosesine 100 ml 2g/L'lik tuzlu su, BMED Prosesinde ise elde edilmesi muhtemel asidik ve alkali çözeltilerin daha saf olabilmesi için 100'er ml 0,009 M HCl ve 0,008 M NaOH ilavesi yapılmıştır.

### 2.2. Ekipmanlar (Equipments)

Çalışmada iletkenlik ve pH analizi için cihazı olarak HACH Lange marka bir çoklu ölçer kullanılmıştır. Ayrıca çalışmada PC-Cell Marka ED-64-4 model bir elektrodializör kullanılmıştır. Söz konusu elektrodializör içerdiği membranlara göre klasik elektrodializör ve bipolar membranlı elektrodializör olarak tanımlanabilmektedir. Bu elektrodializörlere ilişkin ve kullanılan membranlara ilişkin temel bilgiler Tablo 1 ve 2'de, genel mekanizmalar ise Şekil 1 ve 2'de verilmektedir[26-27].

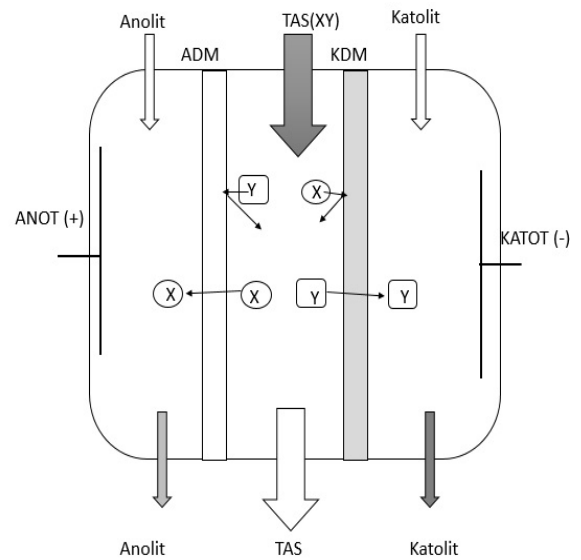
Tablo 1. Elektrodializörün ve besleme düzeneğinin temel özellikleri (General specification of electrolysers and pumping unit)

Özellikler	ED 64-4	BMED 1-3
		(Besleme düzeneği)
Membran ölçüleri (mm <sup>2</sup> )	110 x 110	-
Etkin membran alanı (mm <sup>2</sup> )	80 x 80	-
Hücre kalınlığı (mm)	0,5	-
Debi (L/sa)	4-8	Maks. 150
Maksimum elektriksel (V) gerilim	30	24
Boyut (mm <sup>3</sup> )	165 x 150 x 190	825 x 380 x 419
Ağırlık (kg)	3	28

Tablo 1'de reaktörlere ilişkin fiziksel özellikler verilmiştir. Tabloda yer alan ED 64-4 elektrodializörü ifade ederken BMED 1-3 ise reaktörü besleme düzeneğine ilişkin bilgi vermektedir.

Tablo 2: Elektrodializörde kullanılan membranların temel özellikleri.( General specification of membranes used to electrolysers processes). Elektrodializörün temel özellikleri (General specification of electrolysers)

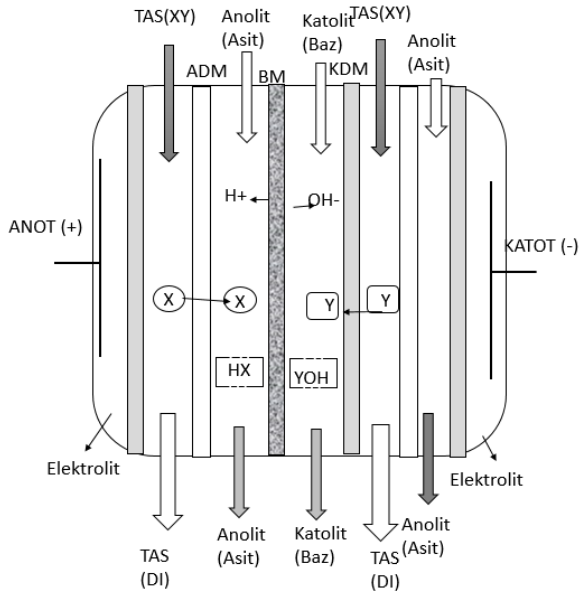
Özellikler	ADM- KDM (Anyon-Katyon Değiştirici Membran)	BM (Bipolar Membran)
Kalınlık (µm)	160-220	180-220
Su ayırma verimliliği (%)	-	>95
Direnç (Ω.cm)	~1.8-2,5	~2
Su içeriği (%)	~9-14	~40
Maksimum İşletme sıcaklığı (C <sup>0</sup> )	50-60	40



Şekil 1. Klasik elektrodializis prosesi genel mekanizması (General mechanism of Classical electrolysers processes), (ADM : Anyon değiştirici membran, KDM: Katyon değiştirici membran, TAS: Tekstil atıksuyu, X: Anyon, Y: Katyon) (ADM : Anion Exchange membrane, KDM: Cation Exchange Membrane, TAS: Textile wastewater, X: Anion, Y: Cation)

Şekil 1'de görüldüğü gibi anyon değiştirici ve katyon değiştirici membranların varlığında iyonik kirleticiler anot ve katoda doğru hareket ederken ilgili kısımda depolanırlar. Çalışmada bu konsantrasyon kısımlarının tekrar tekrar kullanılarak hacim minimizasyonunun sağlanması amaçlanmaktadır.





Şekil 2. Bipolar membran elektrodializ prosesinin genel mekanizması (General mechanism of bipolar membrane electro dialysis processes), (ADM : Anyon değiştirici membran, KDM: Katyon değiştirici membran, TAS: Tekstil atıksuyu, X: Anyon, Y: Katyon, HX: Asit, YOH: Baz, DI: Deiyonize) (ADM : Anion Exchange membrane, KDM: Cation Exchange Membrane, TAS: Textile wastewater, X: Anion, Y: Cation, HX: Acid, YOH: Base, DI: Deionized).

Şekil 2’de de görüldüğü gibi bipolar membranlar vasıtasıyla konsantrasyonun asidik ve alkali çözeltilere dönüşümü sağlanmaktadır. Bu amaçla KED çalışmasında olduğu gibi konsantrasyon diye nitelendirilen asidik ve alkali çözeltilerin yoğunlaştırılması sağlanmıştır.

Çalışmada önemli işletme şartlarından biri olan akım değeri elektriksel gerilim ile iletkenlik parametresi ve membran yüzeyinde oluşması muhtemel kirliliklerin tespiti açısından önemlidir. Bu nedenle çalışmalarda elektriksel gerilim sabit tutulurken akım değerleri ölçülmüştür. Bu değerler besleme düzeneğinin üst limiti olan 24 V olurken uygulanan akım değerleri suyun iletkenliğine göre reaksiyon süresince değişim göstermektedir.

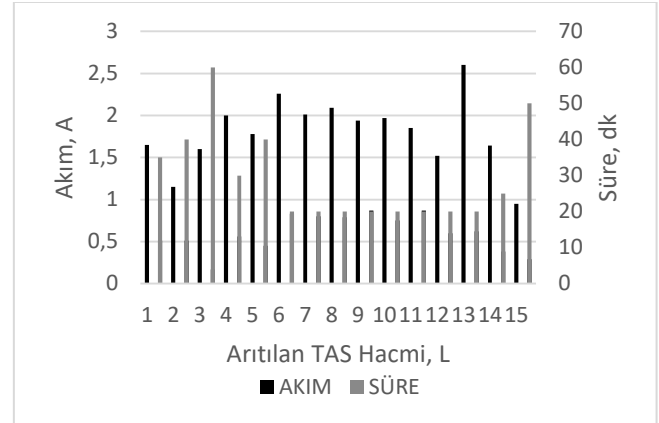
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Çalışmanın bu aşamasında iki farklı membran prosesi ayrı ayrı olarak incelenmiş ve konsantrasyonun minimizasyonu araştırılmıştır.

#### 3.1. KED prosesiyle tekstil atıksuyunun arıtımı (Textile wastewater treatment with CED)

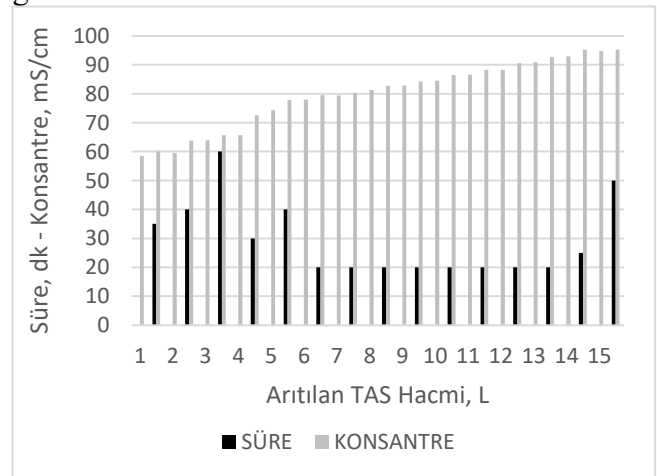
KED prosesi temel olarak iyonik türler üzerinde etkilidir. Genel mekanizma elektrik akımı vasıtasıyla iyonik türlerin taşınımı olduğu için giderim prosesi incelenirken öncelikle arıtılan su miktarına karşılık gelen akım değerleri ve limit

olarak belirlenen  $0,5 \text{ mS/cm}$ 'ye ulaşana kadar geçen süre incelenmiştir. İletkenlik parametresi açısından limit olarak bir değer olması bu parametre vasıtasıyla oluşan sudaki iyonik faaliyetlerin yavaşlamasını engellemek amacıyla. Çalışmada elde edilen sonuçlar Şekil 3’de verilmektedir.



Şekil 3. KED prosesiyle arıtılan atıksu başına akım ve süre değişimi (Changes of current and time per treated wastewater with KED process).

Şekil 3 incelendiğinde akım değeri 13. L'ye kadar dalgalanma gösterirken daha sonra düşüş gösteriyor. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken husus eş zamanlı olarak sürenin artmasıdır. Bu esnadan sonra da arıtım gerçekleştirilebileceği görülmektedir. Şekil 4’de ise arıtılan atıksuyun arıtma süresi ile konsantrasyon akımında yer alan değişim görülmektedir.



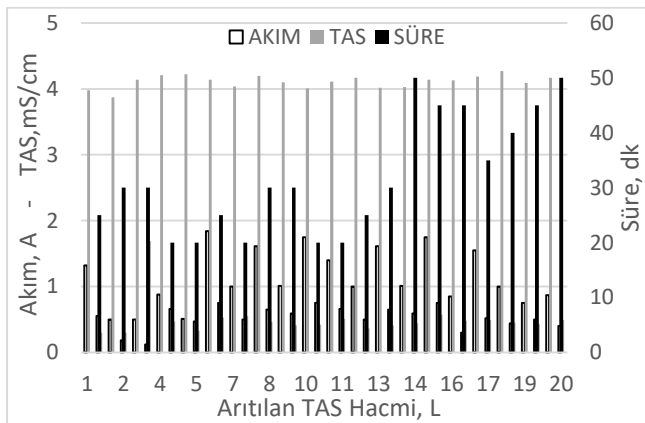
Şekil 4. KED prosesiyle arıtılan atıksu başına süre ve konsantrasyon akım iletkenlik değişimi (Changes of reaction time and reject conductivity per treated wastewater with KED process).

Şekil 4 incelendiğinde ise artan zamana bağlı olarak konsantrasyon akımında oluşan iletkenlik değişimi görülmektedir. Arıtma verimi %90’a ulaştığında çalışma sonlandırılmıştır. Görüleceği üzere 15 L’lik bir atıksuda yer alan kirlenmelerin %90’ı 0,1 L’lik bir konsantrasyon akımına rahatlıkla aktarılabilir. Üstelik bu laboratuvar ortamında yapılmış bir çalışma olarak gerçekleştirilmiştir.

Gerçek ölçekli çalışmalarda bu %0,67'lik konsantrasyon bu oran daha düşük seviyelere indirgeneceği gibi verim artışı da sağlanabilir. Elektrokimyasal arıtım proselerine ekonomik olarak bakıldığında ilk sırada elektrik akımı maliyeti gelir. Bu maliyetin ED proselerinde toplam işletme maliyetine oranı %90 seviyelerinde olduğu bilinmektedir[28]. Bu açıdan bakıldığında bu çalışmada elektrodializ prosesiyle 15 L'lik arıtım sonucunda  $\approx 35$  kW-h/m<sup>3</sup> atıksu seviyelerinde bir elektrik tüketimi olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında ülkemizde 2017 sanayi enerji değerlerine göre  $\approx 10,15$  TL/m<sup>3</sup> (2,56 €/m<sup>3</sup> atıksu olan bir enerji tüketimi görülmektedir[29]. Nitekim bu değerler literatür verileri ile karşılaştırıldığında ortalama olarak 3 kat daha düşük olduğu görülmektedir[30].

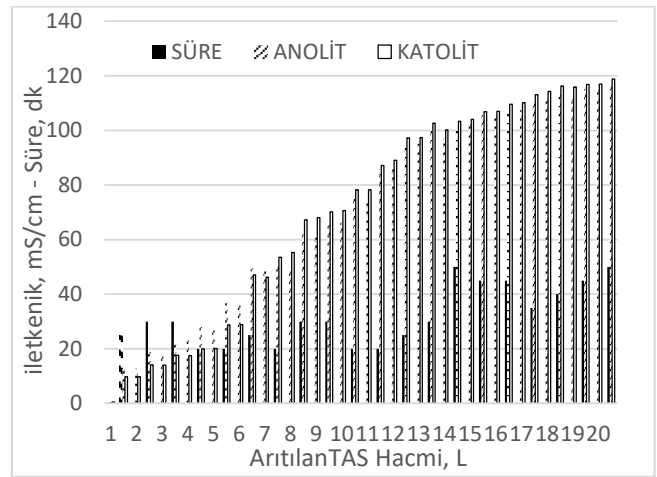
### 3.2. BMED prosesiyle tekstil atıksuyunun arıtımı (Textile wastewater treatment with BMED)

Çalışmanın bu aşamasında klasik elektrodialize ek olarak bipolar membran ilavesi yapılarak konsantrasyon atıktan asidik ve alkali çözelti oluşumu incelenmiştir. Öncelikle arıtılan atıksuya bağlı olarak TAS giriş iletkenlik değerleri ve akım ve iletkenlik değerleri incelenmiştir. Bununla ilgili veriler Şekil 5'de verilmektedir.



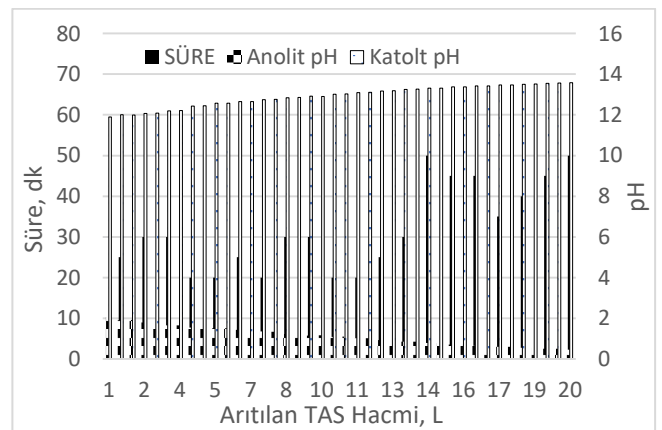
Şekil 5. BMED prosesiyle arıtılan atıksu başına süre, akım değişimi ve giriş TAS iletkenlik değerleri (Changes of reaction time, current and influent TAS concentrations conductivity per treated wastewater with BMED process).

Şekil 5 incelendiğinde arıtılan atıksu hacmine bağlı olarak akım ve süre değişimleri elde edilmektedir. Arıtma süresi 14. L'den sonra artsa da verim yine %90 mertebelerinde olduğu görülmektedir. Üstelik anolit ve katolit olarak adlandırılan kısımlardaki iletkenlik artışı devam etmektedir. Bu iletkenlik artışı Şekil 6'da verilmektedir.



Şekil 2. BMED prosesiyle arıtılan atıksu başına süre değişimi ve anolit - katolit iletkenlik değerleri (Changes of reaction time and anolyte - catholyte conductivity per treated wastewater with BMED process).

Şekil 6 incelendiğinde artan atıksu hacmine bağlı olarak arıtma süresi ve anolit-katolit iletkenlik değerleri verilmektedir. Bu veriler incelendiğinde konsantrasyon akım değerinin %1 seviyelerine düştüğü görülmektedir. Çalışma daha da fazla sürdürülebilir. Özellikle gerçek ölçekli çalışmalarda bu değerler daha da olumlu hale getirilebilir. BMED prosesi, genel mekanizma olarak konsantrasyon akımları (anolit ve katolit) içerikleri nedeniyle karışık asit ve karışık baz çözeltileri olarak da kabul edilebilir. Bu proses vasıtasıyla elde edilen karışık asit ve karışık baz çözeltilerine ilişkin veriler Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 3. BMED prosesiyle arıtılan atıksu başına süre ve anolit - katolit pH değişimi (Changes of reaction time and anolyte - catholyte pH values per treated wastewater with BMED process).

Şekil 7'de dikkat edilmesi gereken en önemli husus pH değerinin başlangıç değerleri 2 ve 12 mertebelerine yakındır. Bunun nedeni başlangıçta konsantrasyon akımlara iletkenlik oluşturacak bir madde ilavesinin gerekliliğidir. Elde edilen asidik ve alkali çözeltilerin safsızlığını önlemek için

sırasıyla anolit ve katolit 0,009 M HCl ve 0,008 M NaOH çözeltisi ilave edilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 0,32 M H<sup>+</sup> iyonu ve 0,38M OH<sup>-</sup> iyonu eldesi sağlanabilmiştir. Bu değerler düşük gibi görünse de başlangıç değerlerine oranla asidik ve alkali çözeltiler sırasıyla (0,32/0,009) 35,6 kat ve (0,38/0,008) 47,5 kat daha yoğun olarak elde edilebilmiştir. BMED prosesinin direkt olarak tekstil atıksuyu ile uygulanmış bir çalışmaya literatürde rastlanılmamıştır. Ters osmoz konsantrasyonuna uygulanmış bir çalışma mevcuttur. Bu çalışmada elde edilen verilere göre arıtım sonucunda 0,12M seviyelerinde bir karışık asit çözeltisi elde edilebilmiştir. Benzer şekilde aynı çalışmada 0,18 M'lık karışık baz çözeltisi elde edilmiştir [31]. Bu değerler incelendiğinde yaklaşık 2,1-2,6 kat daha yoğun asit ve baz eldesi sağlanabilmiştir.

### 3. DEĞERLENDİRME (CONCLUSION)

Çalışmada genel olarak membran proseslerin son dönemde giderek kullanımı artan elektrodializ proseslerinin (KED ve BMED) oluşturduğu konsantrasyonun minimizasyonu için bu kısım sabit tutularak arıtımın gerçekleştirilmesi sağlanmıştır. Diğer membran proseslerde oluşan konsantrasyonun akımın sistemde geri devri gerçekleştirilmektedir. Fakat bu durumda konsantrasyonun söz konusu membranlardan geçemeyerek tıkanma oluşturduğu bilinmektedir. Dolayısıyla bu konsantrasyonun geri devri daha olumsuz sonuçlar alınmasına sebep olmaktadır. Oysa elektrodializ prosesinde oluşan konsantrasyonun kendi içinde döngü halinde olması hem prosesin işleyişi bakımından hem de artan elektriksel gerilim ile daha olumlu sonuçlar elde edilmesine imkan tanımaktadır. Bu sayede sistemde oluşan iletkenlik artışı eşdeğer elektriksel gerilime bağlı olarak akım değerini arttıracaktır. Ardından akım ile gerçekleşen arıtım verimi artacaktır. Sonuç olarak KED prosesinde konsantrasyon oranı %0,67 (0,1 L konsantrasyon/ 15 L atıksu) ve BMED prosesiyle ise %1'lik (0,2 L kullanılabilir çözelti/20 L atıksu) olacak şekilde arıtım sağlanabilmiştir. Ekonomik açıdan değerlendirme yapılırsa literatür verilerine oranla yaklaşık 3 kat daha ekonomik olan bu yöntemle eş zamanlı olarak ED proseslerine oranla ortalama 10-15 kat daha düşük konsantrasyon hacmi ile karşılaşmıştır. Aynı zamanda başlangıçta oranla asidik ve alkali çözeltiler sırasıyla 35,6 ve 47,5 kat daha yoğun hale getirilebilmiştir. Bu açıdan bakıldığında her ne kadar çalışmalar 15 L (KED

Prosesi için) ve 20L (BMED) ile gerçekleştirilmiş olsa da gerçek ölçekli çalışmalarda hem daha düşük oranda bir konsantrasyon oluşumu hem de daha yoğun oranda asidik ve alkali çözeltiler elde edilebileceği görülmüştür.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)



Yazar bu çalışmaya proje olarak desteğinden ötürü Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Birimine teşekkür etmektedir (Proje Numarası: 2014-05-02-GEP02).

### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] Water Environment Federation, "1.Introduction", *Membrane Systems for Wastewater Treatment*, 1.st ed., New York.Mc.Graw-Hill, 1994, pp. 2-10
- [2] M.E. Malack, N.M. Rahman, "Treatment of refinery wastewater using membrane processes". Editors: K. Mohanty, K. Mihir, K Purkait, *Membrane Technologies and Applications*, 120-129, Boca Raton, New York, CRC Press, 2011, ch.7, pp-121-129.
- [3] Y. Shui, L. Yan, C.B. Xiang, L.J. Hong, "Treatment of oily wastewater by organic-inorganic composite tubular ultrafiltration (UF) membranes", *Desalination*, vol. 196, no. 1-3, pp. 76-83, 2006.
- [4] P. Banerjee, T.K. Dey, S. Sarkar, S. Swarnakar, A. Mukhopadhyay, S. Ghosh, "Treatment of cosmetic effluent in different configuration of ceramic UF membrane based bioreactor : Toxicity evaluation of the untreated and treated wastewater using catfish (*Heteroneurates fossilis*)", *Chemosphere*, vol.146, pp. 133-144, 2016.
- [5] L. Andrade, A.O. Aguiar, W.L. Pires, L.B. Grossi, M.C.S. Amaral "Comprehensive bench and pilot scale investigation of NF for Gold mining effluent treatment: Membrane performance and fouling control strategies", *Separation and Purification Technologies*, vol. 174, pp. 44-56, 2017.
- [6] J. Escalona, J. Grooth, J. Font, K. Nijmeijer. "Removal of BPA by enzyme polymerization using NF membranes", *Journal of Membrane Sciences*, vol. 468, pp. 192-201, 2014.

- [7] Y. Song, X. Gao, T. Li, C. Gao, J. Zhou, "Improvement of overall water recovery by increasing RNF with recirculation in a NF-RO integrated membrane processes for seawater desalination", *Desalination*, vol. 361, pp. 95-104, 2015.
- [8] X. Ji, E. Curcio, S.A. Obadani, G.D. Profio, E. Fontananova, E. Drioli. "Membrane distillation- crystallization of seawater reverse osmosis brine", *Separation and Purification Technology*, v.71, pp.76-82,2010.
- [9] Guizi Chen, Yinghong Lu, William B. Krantz, Rong Wang, Anthony G. Fane. Optimization of operating conditions for a continuous membrane distillation crystallization process with zero salty water discharge", *Journal of Membrane Science*, vol. 450, pp. 1-11, 2014.
- [10] K. Kimura. H. Hara, Y. Watanabe, "Removal of pharmaceutical compounds by submerged membrane bioreactors (MBR's)", *Desalination*, vol. 178 (1-3),pp. 135-140, 2005.
- [11] W. Tang , N.G.H. Yong. "Concentration of brine by forward osmosis. Performance and influence of membrane structure", *Desalination*, vol 224, pp.143-153, 2008.
- [12] X.Ji, E. Curcio, S.A. Obadani, G.D. Profio, E. Fontananova Drioli E. "Membrane distillation- crystallization of seawater reverse osmosis brine", *Separation and Purification Technoogy*, vol.71, pp 76-82, 2010.
- [13] G. Qin, C.C.K. Liu, N.H. Richman, J.E.T. Moncur. "Agriculture wastewater treatment and reuse by wind-driven reverse osmosis membrane technology: a Pilot Study on CoconutIsland, Hawai." *Agriculture Engineering*, vol. 32, pp. 365-378, 2005.
- [14] C. Kappel, A.J.B. Kemerman, H. Temmink, A. Jwijnenburg, H.H.M. Rjnaarts, K. NJmeijer, "Impacts of NF concentrte recirculation on membrane performance in and integrated MBR and NF membraneprocesses for wastewater treatment", *Journal of Membranne Science*, vol.453, pp.359-368, 2014.
- [15] K.L.M. Soughton, X. Duan, E.M. Wender, "Federal Energy Management Programme, "Reverse Osmosis Optimization". Introduction the reverse osmosis, energy efficiency & renewable energy, pp.1-5,2013.
- [16] A. Giwa, V. Dufour, F. Al Marzooqi, M. Al Kaabi, S.W. Hasan, "Brine management methods : Recent innovations and current status", *Desalination*, vol.407, pp.1-23, 2017.
- [17] Ulusal Membran Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (MEMTEK), Endüstriyel atıksu membran teknolojileri ile su/ürün kazanımı ve konsantre yönetimi çalıştayı, 2017.
- [18] Balçık-Canbolat Ç, Ölmez-Hancı T, Şengezer Ç, Şakar H, Karagündüz A, Keskinler B. "Tekstil Endüstrisi Atıksularının NF/RO Hibrit Membran Sistemi ile Arıtımı Sonucu Oluşan NF ve RO Membran Konsantrelerinin Bertarafı", (*MEMTEK*) *Endüstriyel Atıksu Membran Teknolojileri Çalıştayı*, 2017.
- [19] İmer DY, Altınay AD, Koyucu İ. "Membran Konsantreleri İçin Arıtım Teknolojileri", (*MEMTEK*) *Endüstriyel Atıksu Membran Teknolojileri Çalıştayı*, 2017.
- [20] Altınay AD, Bitmez M, Aouni A, İmer DY, Hafiani A, Koyuncu İ. "Tekstil Atık Sularının Membran Teknolojiler İle Arıtımı Ve Geri Kullanımı Ve Membran Konsantrelerinin Fiziksel/Kimyasal Metotlar İle Uzaklaştırılması",(*MEMTEK*) *Endüstriyel Atıksu Membran Teknolojileri Çalıştayı*, 2017.
- [21] United States Environmental Protection Agency(USEPA), "Membrane Separation", *Drinking Water Database*, 2007.
- [22] Voltea, Membrane Capacitive deionization (CapDI).[Online]. Available: [http://voltea.com/wp-content/uploads/2016/03/402D002\\_Rev01\\_Tech-Bulletin-Technology-Comparison-1.pdf](http://voltea.com/wp-content/uploads/2016/03/402D002_Rev01_Tech-Bulletin-Technology-Comparison-1.pdf) [Accessed: 30.03.2017]
- [23] G. Qin, C.C.K. Liu, N.H. Richman, J.E.T. Moncur. "Agriculture wastewater treatment and reuse by wind-driven reverse osmosis membrane technology: a Pilot study on CoconutIsland, Hawai."

- Agriculture Engineering*, vol. 32, pp. 365-378, 2005.
- [24] F. Ilhan, H.A. Kabuk, Y. Avsar, M.T. Gonullu. "Recovery of mixed acid and base from wastewater with bipolar membrane electrodialysis – a case study", *Desalination and Water Treatment*, vol.57(11), pp. 5165-5173, 2016.
- [25] APHA ( American Public Health Association), *Standart Methods for the examination of water&wastewater*, 21. Edition, 2005.
- [26] F. Ilhan, H.A. Kabuk U. Kurt, Y. Avsar, H. Sari, M.T. Gonullu. "Evaluation of treatment and recovery of leachate by bipolar membrane electrodialysis process". *Chemical Engineering and Processing*, vol.75, 67-74, 2014.
- [27] PCcell , PCA Ion Exchange Memb.: Technical Data Sheet, [Online]. Available: <http://www.pca-gmbh.com/publi/PCAMembranes.pdf> . [Accessed: 12.06.2017]
- [28] Malack ME, Rahman MM. Electrodialysis in the food industry. Editors: Peinemann KV, Nunes SP, Ciorno L, Membrane Technology, Volume 3, Membranes for Food Applications, 71-84, Weinheim, Germany, Wiley-VCH, 2010.
- [29] Enerji Enstitüsü, Güncel elektrik tarifesi, <http://enerjienstitusu.com/elektrik-fiyatlari/> (05.05.2017).
- [30] Karagiannis IC, Soldatos PG. "Water desalination cost literature :review and assesment", *Desalination*, 223, 448-456, 2008.
- [31] Yao J, Wen D, Shen J, Wang J. "Zero discharge process for dyeing wastewater treatment", *Journal of Membrane Science*, vol.11, 98-103, 2016.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 03.01.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 14.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.283221	

## Gıda makineleri endüstrisinde akış odaklı tesis yerleşimi uygulaması

Nevra Akbilek\*<sup>1</sup>

### ÖZ

İşletmeler, küresel dünyanın katı rekabet ortamına uyum sağlayabilmek ve ayakta kalabilmek için kârlılıklarını arttırmak zorundadırlar. Karlılığı arttırmanın akla gelen ilk uygulaması ürün fiyatlarının arttırılması düşüncesidir. Ancak uzun vadede beklenen kalite düzeyine eşlik eden fiyat müşteri için belirleyicidir. Bu zorlayıcı fiyat faktörü nedeni ile işletmeler öncelikle metot etüdü, kaizen gibi çalışmalarla sürekli olarak süreci optimize ederek maliyeti düşürme yollarını tercih etmektedirler. Sürecin optimize edilmesinin odağında ise öncelikle etkin ve verimli bir fiziksel yerleşim düzeninin tasarlanması yer almaktadır. Bu amaçla endüstriyel gıda üretim makineleri üreten bir fabrikada yerleşim analiz edilmiştir. İşletme siparişe göre proje tipi üretim yapmakta ve müşterilerden gelen talebe göre ürün özellikleri ve ölçüleri sürekli değişiklik gösterebilmektedir. Dolayısı ile ürünlerin bir standardı bulunmamaktadır. İşletme ilk kurulduğunda, bu durum göz önüne alınıp mevcut yerleşim düzeninde sürece göre yerleşim ilkesi benimsenmiştir. Ancak talepteki hızlı değişim, proje bazlı uzun çevrim sürelerine eşlik eden ürün çeşitliliği ve müşterilerin kısa teslim süresi beklentisi, taşıma maliyetlerini arttırmıştır. Malzeme ve yarı mamul taşıma maliyetlerindeki bu artış yerleşim düzeninin revize edilmesini zorunlu kılmıştır. Bu nedenle işgücü, malzeme, makine ve teçhizat gibi kaynakların etkin kullanımını sağlamak ve toplam malzeme taşıma maliyetini en aza indirmek için, WinQSB ve Excel.xls araçları ile yeni yerleşim planı geliştirilmiştir. Mevcut ve optimize edilmiş yeni yerleşim planı malzeme taşıma maliyeti sonuçları karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Tesis yerleşimi, Mag, Craft, gıda makineleri endüstrisi.

### A flow-focused facility layout application in food machine industry

#### ABSTRACT

Businesses have to increase their profitability in order to be able to adapt to the global competitive environment and survive. The first application that comes to mind of increasing profitability is the idea of increasing product prices. However, the price that accompanies the expected level of quality in the long run is determinant for the customer. Because of this compelling price factor, plants prefer to use methods such as method study, kaizen to reduce costs by continuously optimizing the process. The focus of optimizing the process is primarily to design an effective and efficient physical layout. For this purpose, manufacturing layout in a plant that produces industrial food production machines was analyzed. The company produces project-based production according to the order, and product characteristics and measurements can vary constantly according to customer demand. Therefore, there is no standard for the products. When the layout was first established, this situation was taken into consideration and the process layout principle was in the existing layout pattern. However, the rapid change in demand, the product variety that accompanies project-based long cycle times and the expectation of short delivery times have raised total cost of material handling. This increase in the cost of material and semi-finished goods has obliged to revise the layout. Therefore, a new optimized layout plan has been developed with WinQSB and Excel.xls tools to ensure effective use of resources such as labor, materials, machinery and equipment and to reduce total cost of material handling. The present and optimized new layout plan material handling costs are shown comparatively.

**Keywords:** facility layout, Mag, Craft, food machine industry

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü – nakbilek@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tesis yerleşimi, tüm tesislerin bir ürün üretimi veya bir servis dağıtımı için düzenlenmesidir[1]. Yerleşim alternatiflerinin incelenmesi, tüm birimler arasındaki faaliyet ilişkilerinin sağlanmasına hizmet edeceği için kritik bir konudur[2]. Dolayısı ile gerçek hayatta; imalat, hastane, okul, market, havaalanı, depo, su türbini, baskılı devre kartı problemi gibi yerleşim tasarımı içeren birçok uygulamaya sahiptir[3,4]. Tesis planlama problemi 4 temel kategoriye ayrılmaktadır; deterministik, stokastik, dinamik ve statik. Aynı zamanda tesis planlama bir kombinatoriyal optimizasyon problemi olarak tanımlanmaktadır. Kombinatoriyal optimizasyon, olurlu çözümlerin sınırlı bir sayısıdır [5]. Tesis planlama, mevcut tesis bünyesindeki departmanların dizilişini planlar ve böylece kısıtları olan kalitatif veya kantitatif amaç fonksiyonu optimize edilmiş olur[6]. Bu amaç fonksiyonu, malzeme taşıma maliyetinin minimizasyonu[7] ise algoritmik yaklaşımlar kullanılır. Mevcut literatürün çoğunluğu algoritmik yaklaşımları anlatır [1]. Departmanlar arasında istenen ilişkilerin maksimizasyonunda ise prosedürel yaklaşımlar kullanılır ve Muther[8] 'e göre prosedürel yaklaşımlar tasarım proseslerindeki nitel ve nicel amaçların birleşimi [9] veya kombinasyonu olabilir[10]. Tesis planlama problemi çözüm yöntemleri en genel şekli ile kesin (optimal) ve sezgisel yöntemler olarak iki sınıfa ayrılır[11]. Sezgisel metodlar, bilgisayar destekli yerleşim algoritmalarıdır[12,2]. Bu algoritmalar eş ve eşit olmayan boyutlardaki departmanların yerleşim problemi için çok kısa hesaplama zamanlı ve kaliteli çözümler üretebilmektedir[13]. Sezgisel algoritmalar, kurucu ve geliştirici algoritmalar olarak ikiye ayrılmaktadır. Kurucu sezgisel algoritmalar en eski sezgisel algoritmalar fakat uygun kalitede çözüm üretmezler [14]. Liggett yaptığı analiz ile bu algoritmaları kullanarak daha iyi çözüm bulmanın mümkün olduğunu göstermiştir[15] Tesis yerleşimi problemleri tek katlı ve çok katlı olarak da incelenebilmektedir. Kuadratik atama problemi(KAP), tek katlı tesis yerleşimi probleminin departman şekilleri eş ve sabit olacak şekilde sınırlandırılmış bir versiyonudur[16-19]. Loiola and Abreu [20] çalışmalarında KAP modelini incelemişlerdir. Hesaplama zamanı dikkate alındığında bu problem aynı zamanda bir NP-tam problemidir[6,21]. Bu

nedenle daha karmaşık olan farklı alanlı departmanlı, daha ileri kısıtlı (birden fazla katın ve asansörlerin olması gibi) problemler de NP-tam sınıfındadır. Bu sorun birçok araştırmacının CRAFT, ALDEP, CORELAP gibi sezgisel metodlar kullanmalarına neden olur[22]. Uygulama siparişe göre endüstriyel gıda üretim makinelerinin imalatını yapan bir fabrikada gerçekleştirilmiştir. Müşterilerden gelen talebe göre ürün özellikleri ve boyutları değişiklik gösterebilmektedir. Belli başlı ürünlerin temel operasyonları bilinmekle beraber sipariş edilen her üründeki farklılıklara paralel olarak üretim öncesi teknik çizimler güncellenmektedir. Bu nedenle ürünlerin bir standardı bulunmamaktadır ve bir ürünün ortalama üretim süresi 20-40 gün aralığında değişmektedir. İşletme ilk kurulduğunda, bu durum göz önüne alınıp mevcut yerleşim düzeninde sürece göre yerleşim ilkesi benimsenmiş ve buna göre yerleşim düzeni yapılmıştır. Fakat zamanla artan üretim miktarları ve ürün çeşitliliğiyle birlikte, malzeme ve yarı mamul taşıma maliyetlerinin yükselmesi ve verimlilik sorunları yerleşim düzeninin yeniden oluşturulmasını zorunlu kılmıştır. Tompkins ve diğerlerine göre[2], malzeme taşıma maliyeti toplam imalat maliyetinin %20-50'sini oluşturmaktadır ve etkin bir yerleşim planı ile en az %10-30 oranında azaltılabilmektedir. Bir imalat işletmesinde tesis yerleşimi, imalat maliyetleri, proses içi stok, teslim süresi(lead time) ve verimlilik gibi bir çok göstergede önemli bir etkiye sahiptir[23].

Problem bu durumu ele alıp mevcut yerleşim planı ile oluşturulan yeni yerleşim planının karşılaştırılması ve maliyetin optimize edilmesidir. Mevcut yerleşim düzeni, 15 montaj, 1 talaşlı imalat, 5 tesviye, 3 kaynak atölyelerinden oluşmaktadır. Yerleşim planında, yapılan görüşmeler, gözlemler sonucunda montaj atölyelerinin yeniden yerleştirilmesine karar verilmiştir. Buna göre, talep tahmini sonuçları da dikkate alınarak işletme yerleşim planının montaj atölyeleri arasında değişim yapılmıştır.

## 2. UYGULAMA (APPLICATION)

Uygulamanın yapıldığı mevcut yerleşim planının koordinatları ile birlikte Excel çizimi Şekil 1'deki gibidir.

No	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45										
1	A	A	A																																																				
2	A	A	A																																																				
3	A	A	A																																																				
4																																																							
5																																																							
6																																																							
7																																																							
8																																																							
9																																																							
10																																																							
11																																																							
12																																																							
13																																																							

Şekil 1. Excel' de Oluşturulmuş Mevcut Yerleşim( Present Layout in Excel)

Tablo 1. Atölye numaraları ve koordinatları (Workstations numbers and coordinates)

NO	Atölye	Yeri	NO	Atölye	Yeri
1	A(080)	(1,1)-(3,3)	12	L(190)	(8,12)-(10,13)
2	B(090)	(5,4)-(7,7)	13	M(200)	(8,16)-(10,18)
3	C(100)	(5,8)-(7,9)	14	N(210)	(8,19)-(10,19)
4	D(110)	(5,10)-(7,13)	15	O(220)	(5,26)-(7,28)
5	E(120)	(5,14)-(7,17)	16	P (KAYNAK)	(8,14)-(10,15)
6	F(130)	(5,18)-(7,19)	17	R(TESVİYE)	(8,20)-(10,21)
7	G(140)	(5,20)-(7,24)	18	S(ÇATMA)	(8,22)-(10,24)
8	H(150)	(8,4)-(10,5)	19	BORU-PROFİL DEPO	(1,38)-(3,45)
9	I(160)	(8,6)-(10,7)	20	SAC DEPO	(8,41)-(10,45)
10	J(170)	(8,8)-(10,9)	21	ANA DEPO	(12,4)-(13,7)
11	K(180)	(8,10)-(10,11)	22	SEVKİYAT	(5,38)-(7,45)

Tablo 2. MAG hesabında kullanılan B,C,D ve E değerleri tablosu

B:Parçanın yoğunluğu	C: Parçanın biçimi	D:Parçaya veya çevresindekilere zarar verme riski	E: Parçanın Durumu
-2 : Çok Hafif ve Boş	-3 :Çok düz ve yığılabılır veya birbiri içine girebilir.	-2 : Hiçbir şekilde zarar verilemeyen parçalar	0 : Temiz, katı ve stabil
-1 : Hafif ve Hacimli	-2 : Yığmaya ve birbirinin içine girmeye uygun	-1 : Pratik olarak zarar verilemeyen parçalar	+1 : Yağlı, ince ve stabil olmayan
0 : Katı	-1 : Oldukça yığılabılır	0 : Bazı zararlara uğrayabilecek parçalar	+2 : Gres Kaplı, sıcak,çok ince
+1 : Oldukça Ağır ve Yoğun	0 : Yığılma özelliğine sahip kare tabanlı parçalar	+1 :Çarpma, ezilme veya çizme ile zarara uğrayabilecek parçalar	+3 : Zamklı yüzeyler
+2 : Ağır ve Yoğun	+1 : Uzun, Yuvarlatılmış veya biraz düzensiz	+2 : Biraz veya çok zarara yol açabilecek parçalar	+4 : Eritilmiş çelik
+3 : Çok Ağır ve Yoğun	+2 : Çok uzun, Kübik veya düzensiz	+3 : Bazı eşyalara ve çok şeye zarar verebilecek parçalar	
	+3 : Çok uzun bükülmüş veya çok düzensiz	+4 : Çok fazla zarar verebilecek parçalar	
	+4 : Çok uzun ve bükülmüş veya özellikle çok düzensiz		

Tablo 3 .Xyz parçası hacim hesaplama tablosu(size calculation table of the part Xyz)

Profil				
1. Kenar(İç)	2.Kenar(İç)	Boy	HACİM	HACİM
38 mm	78 mm	1260 mm <sup>3</sup>	3734640 mm <sup>3</sup>	3734,64 cm <sup>3</sup>
1. Kenar(Dış)	2.Kenar(Dış)	Boy	HACİM	HACİM
40 mm	80 mm	1260 mm <sup>3</sup>	4032000 mm <sup>3</sup>	4032 cm <sup>3</sup>
			Adet	Sonuç
			2	594,72 cm <sup>3</sup>

$$\text{Profil Hacim} = (((1. \text{Kenar (Dış)} * 2. \text{Kenar (Dış)} * \text{Boy}) / 1000) - ((1. \text{Kenar (İç)} * 2. \text{Kenar (İç)} * \text{Boy}) / 1000)) * \text{Adet}$$

$$= ((40*80*1260)/1000) - (38*78*1260)/1000)) * 2 = 594,72 \text{ cm}^3$$



Aşağıda A'dan başlayıp O'ya kadar devam eden atölyeler montaj atölyesi , A: montaj , P: kaynak, R: tesviye, S: çatma atölyeleridir. Firma kendi içindeki tüm atölyeleri, 10'dan 320'ye kadar numaralandırmıştır. Örneğin 80: montaj-1'dir.

## 2.1. Parça Akış Şiddetlerinin Hesaplanması (Calculation of Part Flow Intensities, MAG)

Mevcut firmada üretimin proje tipi ve otomasyona uzak olması, ürünlerin üretim süresinin 20- 40 gün aralığında değişmesi, çok çeşitli ve fazla sayıda alt komplelere sahip ürünler üretmesi malzeme akışı esaslı bir yerleşimi zorunlu kılmaktadır. Ayrıca endüstriyel ürün üreten tesislerin birçoğunda departmanlar/tezgahlar arasında hareket eden yarı mamullerin çeşitliliğinde artış gözlenmektedir. Parçalar bir tezgahtan diğerine hareket ederken farklı dönüşümlere uğramakta, özelliklerinde (ağırlık, hacim, ebat vs....) çeşitli değişiklikler meydana gelmektedir. Bunun sonucunda düzenlenmek istenen departmanlar/tezgahlar arasında akış ilişkilerini gösterirken birim yük kavramı yetersiz kalmaktadır. Bu gibi durumlarda farklı türden parçaların akış ilişkileri ortak bir metrik cinsinden ifade edilmelidir. Bu sebepten dolayı MAG ölçüm yöntemi geliştirilmiş ve bir parçanın taşınabilirliğini etkileyebilecek unsurlar birkaç kategoride sınıflanıp toplanmıştır[24]. Bu yöntemde MAG sayısı bir parçanın akışının ölçüsüdür ve parça akış şiddeti parametreleri şunlardır:

A: parçanın boyutu ( hacmi )

B: parçanın yoğunluğu

C: parçanın biçimi

D: parçanın çevreye zarar verme riski

E: parçanın durumu

### A değerinin Hesaplanması:

Parçaların hacimleri Excel'de oluşturulan formül tabloları ile hesaplanmaktadır. Boru, için hacim formülleri oluşturulur ve böylece A değeri hesaplanır.

### B,C,D ve E değerlerinin hesaplanması:

Parçaların özelliklerine göre B, C, D, E faktörlerinin değerleri tablo kullanılarak hesaplanmaktadır. Bu tabloda B: Parçanın yoğunluğu, C:Parçanın biçimi, D: Parçaya veya çevresindekilere zarar verme riski, E: Parçanın durumunu ifade etmekte ve tablo 2'de gösterildiği gibi farklı değerler almaktadırlar [24]. Öncelikle yıllık üretim rakamlarına göre üretilen ürünler listelenmekte ve ürün standart parça listeleri

oluşturulmaktadır. Ayrıca ürün parça listelerinde bulunan tüm malzemelerin hacimleri(A değeri) hesaplanır. Daha sonra aşağıdaki tablodaki B,C,D ve E değerleri dikkate alınarak ilgili parçaların dolayısıyla ürünün MAG değeri hesaplanmaktadır.

## 2.2. MAG Hesaplanma Örneği (MAG Calculation Example)

Şekil 3'de gösterilen Kaşar Kuru Haşlama Makinesinin standart parça listesinden yararlanılarak: “xyz” isimli parçanın hacim ve MAG değerleri şöyle hesaplanmıştır: Parça “Profil” dir. Hacmin belirlenmesi için ilgili formül kullanılarak hacim hesaplanır.

### Hacmi hesaplanan parçanın Hacimsel MAG değeri de şöyle hesaplanmıştır:

1.yol Xyz parçasının hacmini yukarıda **594,72 cm<sup>3</sup>**olarak bulmuştuk. Bu değeri hacimsel MAG değerine dönüştürebilmek için interpolasyon uygulamamız gerekmektedir. Yukarıda “Hacim Değerlerine Karşılık Gelen MAG Ölçüleri” tablosundan yararlanarak interpolasyon şöyle yapılır: 1 MAG yaklaşık 150 cm<sup>3</sup>'e karşılık gelir ve 594,72 değeri 150-1500 hacimleri arasındadır.

150 cm <sup>3</sup>	1 MAG
594,72cm <sup>3</sup>	X MAG
1500 cm <sup>3</sup>	3,5 MAG

$$(594,72 - 150) / (1500 - 150) = (X - 1) / (3,5 - 1)$$

$$\Rightarrow X = 1,82 \text{ MAG olarak bulundu.}$$

### 2.yol:

Yukarıdaki interpolasyon mantığı kullanılarak hacimlere değişkenler atanarak formüller oluşturulmuştur şöyle ki; Yukarıda Xyz'nin Hacmi **594,72cm<sup>3</sup>** olarak bulunmuştur. MAG değeri tablosunda hacim değeri T sınıfına denk gelmektedir ve uygun formül uygulanır: Hacimsel  $MAG = (t + 390) / 540 = (594,72 + 390) / 540 = 1,82$  olarak bulunur. Ürünün tüm parçaları için hacim ve hacimsel MAG değerleri yukarıdaki örnekte gösterildiği gibi hesaplanmıştır ve hesaplamalar tablolara işlenmiştir. Daha sonra parçalar özelliklerine göre (boru, profil vb.) ayrılmış ve toplam hacimsel MAG değerleri (A değeri) hesaplanmıştır.

Tablo 6. Kaşar Kuru Haşlama Makinesi Profil Malzemelerinin Hacim ve Hacimsel Mag Değerleri  
(The Bar Material Volume of the Kasher Dry Boiling Machine and its Volumetric Mag Values)

No	Detay Parçanın Adı	Malzeme	Ölçü 1	Ölçü 2	Kal.	Boy	Adet	Açıklama	HACİM	MAG
1	Loadcell şase profili	(Komple)					1	Profil		
2	Xyz	AISI 304	40	80	2	1260	2	Profil	594,72 cm <sup>3</sup>	<b>1,82</b>
⋮	⋮	...	...	...	...	...	...	Profil	...	...
7	abc	AISI 304	40	60	3	1500	2	Profil	873 cm <sup>3</sup>	2,34
⋮	⋮	...	...	...	...	...	...	Profil	...	...
36	klm	AISI 304	40	40	2	890	4	Profil	555,36 cm <sup>3</sup>	1,75
								TOPLAM	<b>13279,79 cm<sup>3</sup></b>	<b>47,59</b>



Şekil 2. KaşarKuru Haşlama Ünitesi (Kasher Dry Boiled Unit)

Tablo 7. Kaşar kuru haşlama makinesi Mag Listesi (Kasher Dry Boiling Machine Mag List)

Ürün Adı	Malzeme	Toplam Hacim (cm <sup>3</sup> )	Toplam Hacimsel MAG Değeri (A)	Parçanın Yoğunluğu (B)	Parçanın Biçimi (C)	Parçaya ve Çevresinde Zehar Verme Riski (D)	Parçanın Durumu (E)	MAG ÖLÇÜSÜ
<b>300lt.KAŞAR KURU HAŞLAMA MAKİNESİ</b>	BORU	5122,3	30,37	2	1	0	0	53,1475
	MİL	13085,39	26,22	3	1	0	0	52,44
	PROFİL	13279,79	47,59	2	2	0	0	<b>95,18</b>
	SAC-LAMA	56346,56	159,07	3	2	1	0	397,675
	<b>TOPLAM</b>							

Tablo.6'da bulunan MAG değeri Hacimsel MAG değeridir ve MAG formülünde[24] A parametresi ile gösterilmiştir. Parçanın taşınabilir özelliklerine göre B, C, D ve E değerleri de formülde ilgili yere yazılmıştır. Parçanın taşınabilir özelliklerine göre

B, C, D ve E değerleri de formülde ilgili yere yazılmış boru, mil, profil, sac-lama, standart parça malzemeleri için toplam MAG değerleri bulunmuştur.

$$MAG = A [ 1 + 1/4 ( B + C + D + E ) ]$$

$$MAG = 47,59 [ 1 + 1/4 ( 2 + 2 + 0 + 0 ) ] = 95,18$$

Kaşar Kuru Haşlama Makine'si için;

Boru malzemeleri toplam MAG değeri 53,1475

Mil malzemeleri toplam MAG değeri 52,44

Profil malzemeleri toplam MAG değeri **95,18**

Sac-Lama malzemeleri toplam MAG değeri 397,675

Standart parça malzemeleri toplam MAG değeri 156,0275 olarak bulunmuştur. Aynı işlemler diğer parçalar ve ürünler için Excel' de tekrar edildi yaklaşık 4500 adet parçanın hacim ve MAG değerleri hesaplandı ve stok hareket listeleri oluşturuldu.

### 2.3.Stok Hareket Listelerinin Oluşturulması (Generating of the Stock Movement Lists)

Yapılan çalışmada; malzeme akışlarının arka depolar(Boru-Profil ve Sac Deposu) ve Ana depodan standart işlemlerden geçtikten sonra, Montaj Atölyelerine doğru gerçekleştiği görülmüştür ve hareketler buna göre gruplandırılmıştır. Arka depolardan akışları gerçekleşen malzemeler: Boru, Sac- Lama, Profil, Mil, Talaşlı İmalat Malzemeleridir. Ana depodan akışları gerçekleşen malzemeler: Cıvata, Somun, Menhol, Plastik Kulp, Bakır Telli Poliüretan Hortum, Pompa, Rulman, Segman, Rondela, Rekor Takımları, Setskur, Dirsek v.b. dir.

### 2.4. Yıllık Akış Şiddetleri, Rota ve Toplam Maliyetlerin Hesaplanması (Calculation of the Annual Flow Intensity, Route and Total Cost)

Yapılan uygulamada yıllık talep esas alındığından, bulunan MAG değerleri yıllık talep ile çarpılarak Yıllık Akış Şiddetleri bulundu. Ürünlerin yıllık talebi, son 3 yıla ait üretim rakamlarının ortalaması alınarak en çok üretilen ürünlerin talepleriyle belirlenmiştir.

**YILLIK AKIŞ ŞİDDETİ = ÜRÜNÜN YILLIK TALEBİ x ÜRÜN MAG DEĞERİ**

Ürün bazında rotalar oluşturuldu ve mevcut modele göre mevcut yerleşim düzeninin toplam maliyeti hesaplandı.

**TOPLAM MALİYET= AKIŞ ŞİDDETİ x UZAKLIK x BİRİM TAŞIMA MALİYETİ x ÜRETİM MİKTARI**

Uzaklık olarak, AUTOCAD Programında çizilmiş olan mevcut yerleşim planında, iki bölüm arasındaki mesafe ağırlık merkezleri arasındaki uzaklık olarak hesaplandı. İnsanlar doğru boyunca yürüdükleri için Öklid uzaklık yerine doğrusal uzaklık formülü kullanıldı. Böylece i. ve j. atölyeler arasındaki uzaklık i ve j bölümlerinin ağırlık merkezleri arasındaki uzaklıktır.

Eğer;

i' nin ağırlık merkezi = (  $x_{(i)}$ ,  $y_{(i)}$  )

j' nin ağırlık merkezi = (  $x_{(j)}$ ,  $y_{(j)}$  )

Olmak üzere doğrusal uzaklıklar aşağıdaki gibi hesaplanmıştır:

**Doğrusal Uzaklık=  $|x_{(i)} - x_{(j)}| + |y_{(i)} - y_{(j)}|$**

Birim taşıma maliyeti her atölye arası 1br. olarak alınmıştır. Ayrıca firma içinde toplam 32 adet olan atölye olup bunlar 10'dan 320'ye kadar numaralara sahiptir. Örneğin Lazer-1 tezgahı, 10 numaralı atölye olarak bilinmektedir.

## 3. YÖNTEMLER (METHODS)

### 3.1. WinQSB' ile Tesis Düzenleme (Facility Arrangement with WinQSB)

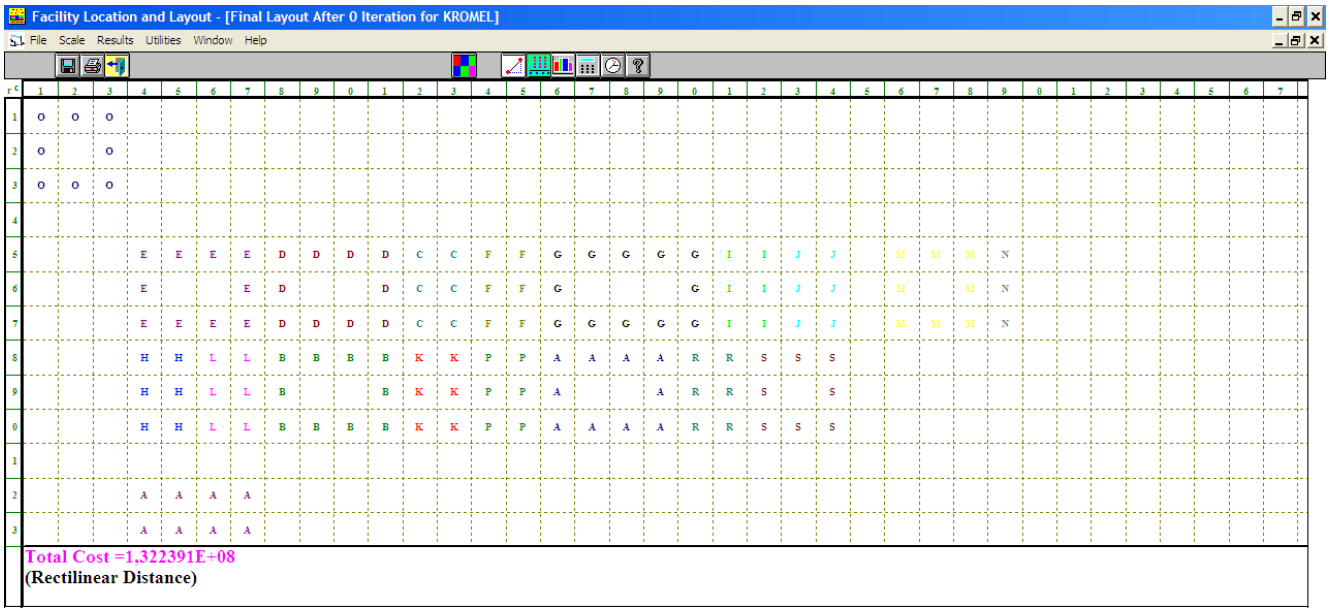
WinQSB, craft-tabanlı bir algoritma kullanmaktadır. Bu algoritma bir başlangıç çözümü üzerinde ikili ve çoklu değişimler yaparak en iyi çözüme ulaşmaya çalışır. Uygulamasında amaç; Üretilen ürün parçalarının işlem gördüğü atölyeler arasındaki toplam yıllık akış miktarı kullanılarak en düşük maliyet ile birlikte en yüksek verim sağlayacak şekilde yerleştirmektir. Ana Depo ve Arka Depoların yerleri sabit kabul edilmiştir. Aynı zamanda montaj atölyelerinin arasında bulunan kaynak ve tesviye atölyeleri de sabit olması gereklidir. 15 montaj atölyesi ve 1 profil çatma atölyesi için yerleşim planlanmıştır. Bu planda bir birim taşıma maliyeti 1 TL olarak kabul edilirse; mevcut durumun maliyeti, 1,824329E+08 TL olarak elde edilir.

### 3.1. 1. WinQSB İki Yer Değiştirme (Two-way Swap with WinQSB)

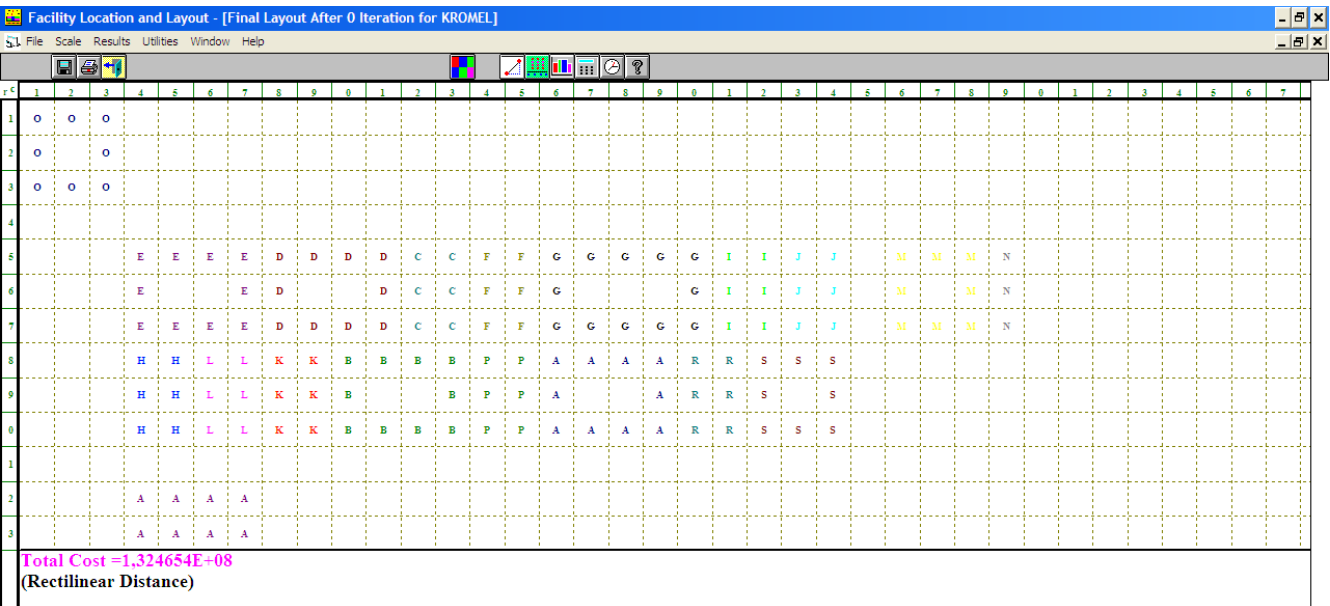
Burada Çözüm Seçeneği olarak “İki Departman Değiştirerek Geliştirme” seçeneği seçilir. Uzaklıklar “Doğrusal” olarak seçilmiştir. Uygulama yapılan firmanın koşulları göz önüne alınarak programın vermiş olduğu sonuca en yakın olacak şekilde sezgisel olarak yerleşim yapılmıştır. Buna göre aşağıda, yapılan yeni düzenlemenin yerleşim planı ve maliyeti Şekil. 3’te verilmiştir.

### 3.1. 2. WinQSB Üçlü Yer Değiştirme (Three-way Swap with WinQSB)

Burada Çözüm Seçeneği olarak “Üç Departman Değiştirerek Geliştirme” seçeneği seçilir. Uzaklıklar “Doğrusal” olarak seçilmiştir. Uygulama yapılan firmanın koşulları göz önüne alınarak programın vermiş olduğu sonuca en yakın olacak şekilde sezgisel olarak yerleşim yapılmıştır. Buna göre Şekil. 4’te, yapılan yeni düzenlemenin yerleşim planı ve maliyeti verilmiştir.



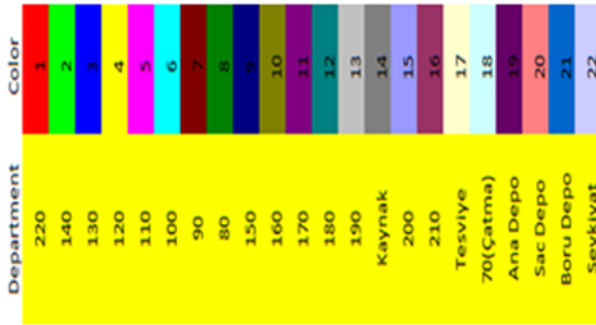
Şekil 3. 2'li Değişim Uygulanmış Yerleşim ve Maliyeti (Two-way exchange applied layout and its cost)



Şekil 4. 3'lü Değişim Uygulanmış Yerleşim ve Maliyeti (Three-way exchange applied layout and its cost)

### 3.2. Excel. xla İle Tesis Düzenleme (Facility Arrangement with excel.xla)

Excel’ de tesis yerleşimi yapabilmek için ilk adım layout.xla eklentisini Excel’e eklemektir. Bu eklentiyi ekleyebilmek için internet üzerinden layout.xla eklentisi bulunur ve bilgisayara Excel eklentisi olarak kayıt edilir. Daha sonra bu eklentiyi Excele tanıtmamız gerekecektir. Başlangıçta New Layout seçeneği seçilir ve çıkan ekrana tesisin ismi, departman sayısını, bu departmanlardan kaç tanesinin yerinin sabit kalacağını ve uzunluk ölçü birimi girildi. Daha sonra fabrikanın alan boyutları, her departmanın alanları ve isimleri girildi. Departman tanımlama ekranında, yerleri sabit tutulacak olan departmanlar programa verilir. Daha sonra departmanlar arası akış ve maliyetleri girilir. Metod olarak Craft yöntemi seçilmiştir. Mesafe ölçüsü olarak da doğrusal uzaklık kullanılmıştır. Şekil 5’te mevcut durumun; departmanların numaraları-isimleri, renkleri, alanları ve koordinatları verilmiştir. Şekil 6 ve 7’deki siyah noktalar akışların gerçekleştiği yerlerdir.



Şekil 5. Mevcut Departmanlar ve Numaraları (Present Departments and Their Numbers)



Şekil 6. Mevcut yerleşim düzeni ve maliyeti (Present layout and its cost)



Şekil 7. Layout. xla uygulanmış yerleşim düzeni maliyeti (Layout.xla applied layout cost)

Iterations: 5			
Iter.	Type	Action	Cost
1	Switch:	1 and 8	2323539,25
2	Switch:	8 and 18	2116395,75
3	Switch:	4 and 7	2021818,625
4	Switch:	10 and 13	1990583,25
5	Switch:	2 and 18	2018223,75

Şekil 8. İterasyonlar sonrası maliyet değişimleri ( The Cost Changes After Iterations)

## ANALİZ (ANALYSIS)

Genel bir değerlendirme yapılacak olursa;

Mevcut maliyet 3 şekilde hesaplanmıştır:

WinQSB programı çözümüne göre çıkan sonuç **182.432.900 TL**'dir.

Excel Layout.xla eklentisi çözümüne göre çıkan sonuç **2.543.149,5 TL**'dir.

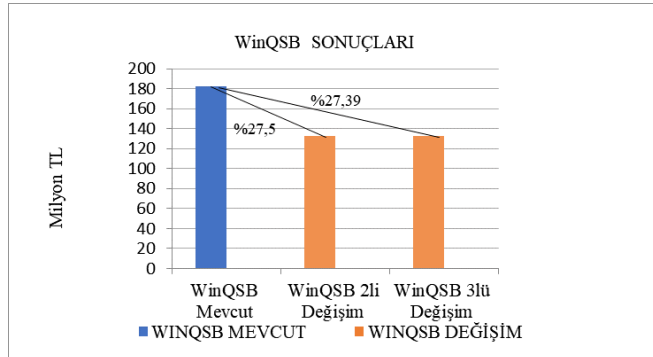
Yeniden yerleşimden sonra oluşan maliyetler Şekil 9'daki gibidir:

2'li değişimden sonra firmaya uyarlanmış halde yeni maliyet **132.239.100 TL** olarak hesaplanmıştır. İyileşme **%27,5** olarak

WinQSB 3'lü değişime göre :

3'lü değişimden sonra firmaya uyarlanmış halde yeni maliyet **132.465.400 TL** olarak hesaplanmıştır. İyileşme **%27,39** olarak bulunmuştur.

WinQSB 2'li değişime göre :

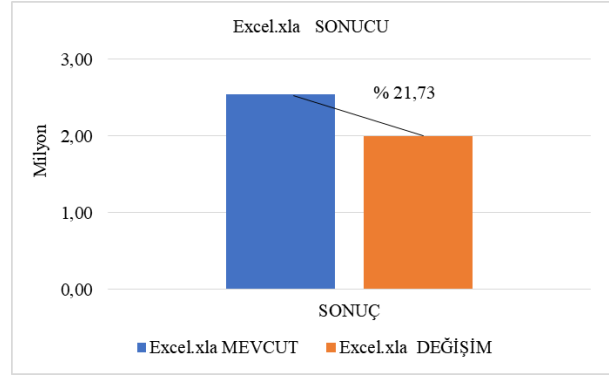


Şekil 9. WinQSB Sonuçları (The Results of WinQSB)

Excel Layout. xla eklentisi çözümüne göre çıkan sonuç Şekil 10'da gösterildiği gibi **2.543.149,5 TL**.

Excel Layout. xla eklentisinden çıkan sonuca göre **1.990.583,3 TL**.

İyileşme **% 21,73** olarak bulunmuştur.



Şekil 10. Excel.xla Sonucu (The Result of Excel.xla)



Gıda makineleri sektöründe faaliyet gösteren bir firma için tesis yerleşiminin mevcut maliyeti ve taşımaları analiz edilmiş ve problemler giderilmeye çalışılmıştır. Yerleşim planında, montaj atölyeleri yeniden yerleştirilmiştir. Buna göre, işletme yerleşim planının montaj atölyeleri arasında değişim yapılmıştır. Analizler incelendiğinde, WinQSB 3'lü değişim sonrası iyileşme **%27,39**, WinQSB 2'li değişim sonrası iyileşme **%27,5** ve Layout.xla eklentisi değişim sonrası iyileşmenin **%21,73** olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, WinQSB 2'li değişim sonrası yeni yerleşimin diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bu nedenle WinQSB 2'li yerleşimin kullanılmasına karar verilmiş ve işletmenin yeni yerleşimi bu yöntemle yapılmıştır.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] S. Heragu, "Layout Planning Models and Design Algorithms", *Facilities design*, PWS Publishing, Boston, 1997.
- [2] Tompkins JA, White JA, Bozer YA, Tanchoco JMA, *Facilities planning*. Wiley, New York, 2003, pp. 298-357.
- [3] S.P. Singh, R.R. Sharma, A review of different approaches to the facility layout problems, *Int.J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 30, no.5, pp. 425-433, Sep., 2006.
- [4] M. Mohammadi, K. Forghani, A novel approach for considering layout problem in cellular manufacturing systems with alternative processing routings and subcontracting approach, *Appl.Math.Model.*, vol.38, no.14, pp.3624-3640, 2014.

- [5] Winston WL, *Introduction to mathematical programming: applications & algorithms*. PWS-KENT, Boston, 1991.
- [6] I. Jankovits, C. Luo, M.F. Anjos, A. Vannelli, A convex optimization framework for the unequal areas facility layout problem, *Eur.J.Oper.Res.* vol.214, no.2, pp.199–215, 2011.
- [7] S.Kulturel Konak, A. Konak, Unequal area flexible bay facility layout using ant colony optimization, *Int.J.Prod.Res.* vol. 49, no.7, pp. 1877–1902, 2011.
- [8] Muther, R., *Systematic Layout Planning*, 2nd ed., Cahners Books, Boston, 1973.
- [9] Yang, T., Kuo, C., "A Hierarchical AHP/DEA Methodology for the Facilities Layout Design Problem", *European Journal of Operational Research*, vol.147, no.1, pp.128-136, May, 2003.
- [10] G.Aiello, G.L.Scalia, M.Enea, A multiobjective genetic algorithm for the facility layout problem based on slicing structure encoding, *Expert Syst. Appl.* vol.39, no.12, pp.10352–10358, Sept.2012.
- [11] Ghorbanali Moslemipour & Tian Soon Lee & Dirk Rilling, A review of intelligent approaches for designing dynamic and robust layouts in flexible manufacturing systems *Int J Adv Manuf Technol* vol.60, no.1, pp.11–27, April 2012.
- [12] Francis RL, McGinnis LF, White JA, *Facility layout and location, an analytical approach*, 2nd edn. Prentice-Hall, New Delhi, 2009.
- [13] Kusiak A, Heragu S., The facility layout problem. *Eur J Operation Res* vol.29, no.3, pp. 229–251, June 1987
- [14] Scholz D, Petrick A, Domschke W, STaTS: a slicing tree and tabu search based heuristic for the unequal area facility layout problem. *Eur J Oper Res* vol. 197, no.1, pp.166–178, 2009.
- [15] Liggett RS., The quadratic assignment problem: an experimental evaluation of solution strategies. *Manag. Sci.*, vol.27, no.4, pp. 442–458, 1981.
- [16] K.G.Ramakrishnan, M.G.Resende, P.M.Pardalos, "A branch and bound algorithm for the quadratic assignment problem using a lower bound based on linear programming" in *State of the Art in Global Optimization*, vol.7, C.A.Floudas, P.M.Pardalos (Eds.), Springer, US, 1996, pp. 57–73.
- [17] P.M. Pardalos, H.Wolkowicz (1994), *Quadratic Assignment and Related Problems: DIMACS Workshop*, American Mathematical Society, vol.16. [Online]. Available: <http://dimacs.rutgers.edu/Volumes/Vol16.html>
- [18] P.M.Pardalos, D. Du, (1998), Network design: connectivity and facilities location: DIMACS Workshop, American Mathematical Society, vol.40. [Online]. Available: <http://dimacs.rutgers.edu/Volumes/Vol40.html>
- [19] P.M. Pardalos, L.Pitsoulis, *Nonlinear assignment problems: algorithms and applications*, Springer, US, 2013.
- [20] Loiola EM, Abreu NMM A survey for the quadratic assignment problem. *Eur J Oper Res*, vol. 176, pp.657–690, 2007.
- [21] J.A.Bland, G.P.Dawson, Large scale layout of facilities using a heuristic hybrid algorithm, *Appl.Math.Model.*, vol.18, no.9, pp.500–503, 1994.
- [22] A.Kusiak, S.S.Heragu, The facility layout problem, *Eur.J.Oper. Res.* vol.29, no.3, pp. 229–251, 1987.
- [23] Drira A, Pierreval H, Hajri-Gabouj S (2007) Facility layout problems: a survey. *Annu. Rev Control* 31:255–267.
- [24] Raymond A., "Plant Layout and Material Handlings", *Materials handling handbook*, Kulviec, USA: John Wiley & Sons, Inc, 1985, pp. 30.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 16.01.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 14.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.286029	

## Cıvata soğuk dövme işleminde kalıp ömrünün arttırılması: dövme kademe tasarımının etkisi

Cenk Kılıçaslan<sup>\*1</sup>, Umut İnce<sup>2</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada özel M10x32 dog-point cıvataların soğuk dövme işleminde meydana gelen kalıp hasarı Simufact.forming sonlu elemanlar simülasyon programı kullanılarak incelenmiş ve dövme kademe tasarımlarında değişimler yapılarak kalıplar üzerinde meydana gelen yüksek gerilme değerlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Çalışmanın ilk kısmında cıvataya ait beş farklı dövme kademesinde meydana gelen malzeme akışı modellenerek belirlenmiş, kalıp kırılmasının yaşandığı dövme kademesinde oluşan kontak basınçları ile kalıp gerilmeleri tespit edilmiştir. Simülasyonlar cıvata kafa ve flanş kısmının dog-point'in oluşturulduğu dövme kademesinde aynı anda şekillendirilmesi nedeniyle sabit kalıp üzerinde yüksek çekme gerilmesinin oluştuğunu ve kalıbın bu nedenle hasara uğradığını tespit etmiştir. Bu durumu engellemek amacıyla dog-point kısmı bir sonraki dövme kademesine alınmış ve hazırlık açısı 40°'ye düşürülmüştür. Buna ek olarak tek parça olan dövme kalıbı tasarımı iki parçalı tasarım ile değiştirilmiştir. Bu tasarımlar ile gerçekleştirilen simülasyonlar dövme kalıbındaki gerilmenin yaklaşık %70 oranında azaldığını göstermiştir. Son olarak yenilenen kalıplar ile yapılan üretim denemelerinde kalıp ömrünün 3.8 kat arttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Soğuk dövme, cıvata, simülasyon, kalıp, hasar

## Tool life enhancement in cold bolt forging process: effect of forging stage design

### ABSTRACT

In this paper, tool failure evolution in cold forging process of special M10x32 dog-point bolts was investigated with Simufact.forming finite element software. In the first part of the study, material flow in the five different forging stages were modeled and contact and tool stresses were determined. Simulations revealed that simultaneous forming of the flange, head and socket of the bolt with dog-point section causes excessive tensile stress evolution on the stationary die which leads to tool fracture. To prevent the failure, forming of dog-point section was shifted to further forging stage and preparation angle for dog-point was decreased to 40°. In addition, monolithic tool design was replaced with split insert design. Simulations carried out with these designs showed that tool stress was decreased about 70%. Finally, forging trials were also conducted with the updated tools and tool life was seen to increase about 3.8 times.

**Keywords:** Cold forging, bolt, simulation, tool, failure

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Dr. Cenk Kılıçaslan Norm Cıvata San. ve Tic. A.Ş., 10007 Sok. No:1/1 A.O.S.B. 35620 Çiğli/İzmir

<sup>2</sup> Umut İnce Norm Cıvata San. ve Tic. A.Ş., 10007 Sok. No:1/1 A.O.S.B. 35620 Çiğli/İzmir



## 1. INTRODUCTION

Cold forging is a metal forming process which enables high speed mass production with great mechanical properties. Leading automobile companies starts to prefer complex forged parts for their superior mechanical properties over cast and machined parts [1]. This forces forging companies to decrease production costs. Due to increasing geometrical complexity of the parts, forging tools (dies) are exposed to excessive forming loads which negatively affects service life of tools. Strain hardening of workpiece material, extreme friction conditions, high strain rates and poor lubrication are also triggers of tool failure. In cold forging tools, main failure mechanisms can be listed as; i) plastic deformation, ii) wear and iii) fatigue [2, 3]. In cold forging process, dies and punches are subjected to compressive stresses up to 2000 MPa that may lead plastic deformations like chipping and local fractures. In some cases, complete bending of a punch may happen. For these reasons, high compressive strength and hardness are required for tool materials [4]. Wear is the loss of the material from the parts that are in contact due to excessive friction under high normal stress. In metal forming operations, wear has a great influence on tool life, dimensional accuracy and surface quality of products [5]. Dynamic and repeated forging of workpiece material causes cycling loading on forging dies and it may lead crack initiation and early fracture of the die which is classified as fatigue failure [6]. More information about failure of dies and molds can be found in the review paper of Jhavar, Paul and Jain [7]. Tool life has significant impact on forging cost in fastener production. As cold forging tool costs cover 10% for standard and 40% for special bolts of total production cost, it is crucial to improve tool life to increase competitiveness of the company. It is also important to decrease inactive time of the forging press due to replacing of failed dies, labor efforts and energy. At this point, quick application of finite element simulations of metal forging operations becomes very valuable in order to make design modifications to increase the effectiveness of the dies. In metal forming industry, researches were mainly focused on numerical modeling of forming processes. Simulations has been used in German and American forging industry since 1980s [8]. Industrial and scientific applications of metal forming simulations grew with the

development of commercial finite element softwares in 1990s. Metal forming simulation softwares like Simufact.forming, SFTC Deform, Forge NxT and Qform are leading examples. By the help of these softwares, stress distribution can be determined on tools and results of critical design modifications can be obtained without conducting any trial-error studies in the production. In the literature, studies are mainly focused on tool life estimation, effects of die surface modifications to improve tool life, failure mechanisms and shrink fitting effects on the tool stresses. Geiger et al. [9] investigated Von-mises stress distribution in extrusion process and they used numerical results to obtain optimum die shoulder geometry. It was concluded that Von-mises stress on the die was reduced to 1050 MPa from 1535 MPa with the usage of optimum radius value in extrusion die. Berns et al. [10] determined the critical stress area on dies in the process of screw forging. Particle distribution in metal matrix of forging die was then optimized by using microscale simulations to get highest cracking resistance. Double dispersed tool material was found to be 30% higher fracture toughness in contrast to single dispersion material. Vazquez et al. [11] revealed the potential of different methods to improve tool life in cold forging. Usage of tougher insert material, increasing shrink fit ratio and splitting insert from the locations where the maximum principle stress is highest were determined to be very effective on tool life enhancement. Engel and Popp [12] applied excimer laser to surface of cold forging die to form microtextures. It was found that microtextures provide extra space for lubrication in contrast to polished surfaces and the tool life was increased up to 300%. Lee et al. [13] investigated the effect of shrink fitting ratios on the effective stress generated on cold forging dies in the process of hexagonal bolt and gear forming. Optimum shrink fitting ratios were 0.52 and 0.75% for first two bolt forging stages and 0.33% for gear forging. It was also concluded that appropriate shrink fitting ratio should be determined for each operation to get high cycle fatigue tool life. Andreas et al. [4] investigated the effects of surface finishing operation on tribological properties of G55 cemented carbide. After EDM (Electric discharge machining), tool surface was shot peened and polished with diamond grits having 15  $\mu\text{m}$  (D15), 9  $\mu\text{m}$  (D9), 6  $\mu\text{m}$  (D6) and 1  $\mu\text{m}$  (D1). It was determined that polishing up to D6 leads to reduce friction factor to 0.03 while polishing with D1

does not have any influence on friction factor. It is also important to note that decrease in surface roughness may cause to reduce oil retaining ability of the surface which results an increase in friction. Ku and Kang [1] modeled the multi-stage cold forging process of steel outer race of BJ-type CV joint and determined the tool stresses. Experimental application of the process revealed that part was well formed with desired dimensions without experiencing any tool failure. It was concluded that results of the numerical simulation was very applicable. Ku and Kang [14] used numerical forming simulations to investigate flow of inner race with ball groove parts. Tool failure was detected after forging of 15 parts. Tool stress analysis were carried out with Deform software and tool modification, increasing tool fillet radius from 1 to 100 mm, was seen to decrease tool stress about 70%. Yurtdaş et al. [15] revealed the potential usage of carbon fiber reinforced composite tubes as stress rings in cold forging dies. Study showed that shrink fitting ratio can be increased up to 3.5% with carbon fiber composites while conventional tool steel stress rings allows maximum 0.7% shrink fitting ratios.

In this paper, multi-stage cold forging process of special M10x32 dog-point bolts was investigated numerically to reveal the reasons of tool failure occurred in fourth forging stage of the operation. Forging simulations and tool analyses were carried out in Simufact.forming finite element software. Material flow in the five different forging stages, contact and tool stresses were determined. Modifications were made in die geometry and forming simulations were repeated to reduce tool stresses.

## 2. COLD FORGING PROCESS AND TOOL FAILURE

M10x32 dog-point bolts were forged from annealed DIN 1.5536 steel alloy on a forging press having maximum capacity of 1395 kN (140 tones) in Norm Fasteners Co./Turkey. Forging stages and final bolt geometry before threading process (Stage 5) are shown in Figure 1. The bolt is forged to desired geometry and dimensions through using five forging stages. The process begins with the shearing of the work-piece material from a continuous bar. Work-piece is then transferred to stage 1 by grippers. Top die pushes the work-piece and forces it to flow through stationary die cavity. After finishing the forming stroke, ejector pushes

the formed part and throw it through the outside of the die. Grippers again hold the formed part and transfer it to the next forging stage. As shown in Figure 1, extrusion process is conducted in stage 1. Furthermore, head section of the part is prepared for hexagonal shape in stage 2. The initial hexagonal shape is given to the part in stage 3. In stage 4, socket, flange and dog-point in the shaft is formed. At final stage reduction in the shaft is formed.

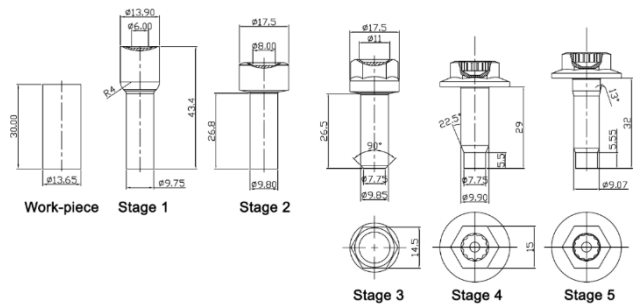


Figure 1. Forging stages of M10x32 dog-point bolt.

Technical drawing of stage 4 die couple is shown in Figure 2(a). Die system consists of moving and stationary die. Tool failure was seen on the die number 4 which forms dog-point section on the shaft. The picture of the failed tool is shown in Figure 2(b). As depicted in the figure, fracture started from the tool radius and propagated longitudinally though the outer diameter of the WC-Co insert. Surface cracking was also seen inside the tool cavity as depicted with the arrows in Figure 2(b). This type of failure seen on the forging tools is classified as forced ruptures and caused by excessive forging loads [16]. Because of that, forging load and tool stress distribution have to be investigated.

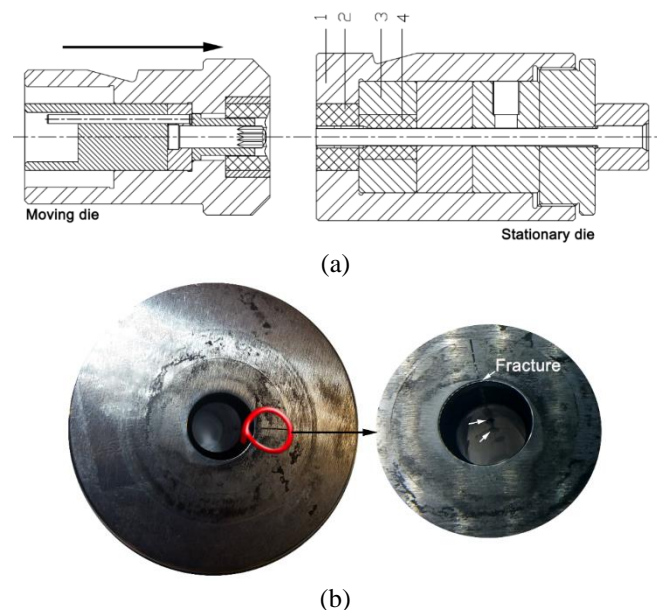


Figure 2. (a) Die system of stage 4; moving and stationary die, (b) the picture of fractured tool.

### 3. NUMERICAL MODELS

Numerical models of cold forging operation were prepared in Simufact.forming finite element software. Mechanical models were also coupled with thermal analysis to consider temperature effects on flow stress of the workpiece material. Examples of numerical models are shown in Figure 3. Stage 1 and 2 were simulated with 2D models due to the axisymmetry while 3D models were used for stage 3, 4 and 5. As shown in the figure, numerical models consist of stationary and moving dies and the workpiece. Dies were modeled as rigid. Due to high speed of the forging process, no heat transfer was defined between dies and workpiece. Workpiece material, DIN 1.5536, was modeled as plastic material and true stress-true plastic strain curves between temperatures of 20 and 400°C and strain rates between 1 and 50 s<sup>-1</sup> was defined to the software. In 2D models, 5,000 quad elements were used in the mesh of the workpiece. In 3D models, half of the semi-formed part was modeled and symmetry plane was defined to decrease calculation time. Non-homogenous mesh distribution was used in 3D models. Smaller elements were used on the main deformation areas as depicted in Figure 3(b) and total 28,000 hex elements were used in the finite element mesh. Proper modeling of friction is crucial to get realistic material flow in metal forming simulations. In this study, temperature dependent Coloumb friction coefficient was defined to the software.

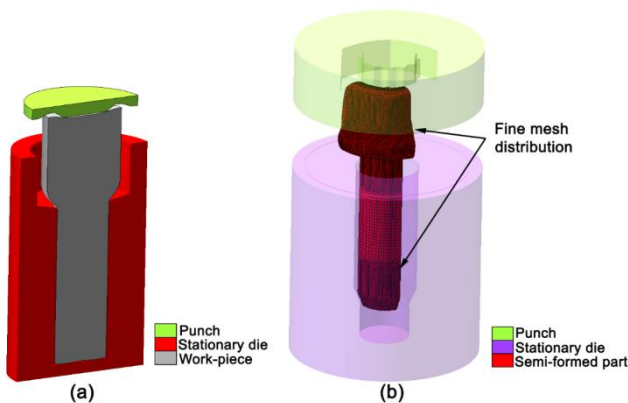


Figure 3. Examples of numerical models; (a) 2D axisymmetric and (b) 3D models.

After conducting forming simulations, tool stress analysis were carried out for stage 4. Numerical model of stationary die system is shown in Figure 4. Tool numbers in the figure are same with the ones depicted in Figure 2(a). Here, no.1 and no.3 are stress rings made of DIN 1.2344 while no.2 and no.4 are inserts made of WC-27%Co (G55). In the

numerical model, stress rings and inserts were assumed to be elastic materials. Elastic modulus and poisson's ratio of DIN 1.2344 and G55 are 215 GPa and 0.3 and 450 GPa and 0.22, respectively. The tensile strength of DIN 1.2344 is about 1380 MPa. Due to fracture evolution on no.4 insert, compressive (3000 MPa) and tensile strength (700 MPa) of G55 material were used failure criteria. Shrink fit was also considered in the tool stress analysis and 0.5% shrink fitting ratio was applied between stress rings and inserts. In the numerical model, dies no.3 and no.4 were fixed from the their lower surfaces in all directions and rotations. The forging force determined from forming simulations was applied to the elastic dies. Tetrahedral elements were used in the finite element meshes of inserts and stress rings. Each insert and stress ring consist of 154,000 and 160,000 tetra elements, respectively. Fine mesh distributions were used on the fracture locus.

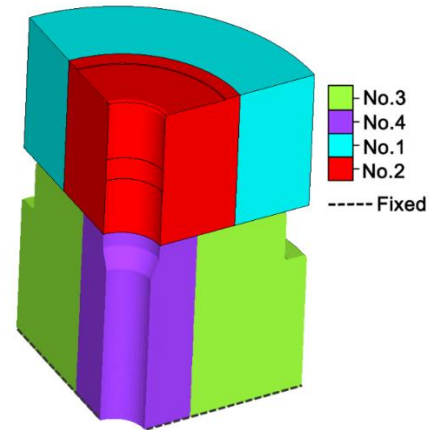


Figure 4. Numerical model of tool stress analysis in stage 4.

### 4. RESULTS AND DISCUSSIONS

Figure 5 shows the distribution of effective plastic strain on each forging stage. In extrusion process, stage 1, max. plastic strain value was found around 1.2 on the shaft. In stage 2, pre-heading operation was conducted and preparation form of socket was formed. Here, max. plastic strain reached 0.5 on the head while strain values on the shaft remained the same. In stage 3, hexagonal shape was given to the head section which increases plastic strain value to 2.2. Preparation for the dog point geometry was also formed on the end of the shaft and plastic strain reached 3.6 on this area. Final geometry of the head and socket were given in stage 4. Due to the excessive forming, plastic strain was found to be around 5. On the shaft, dog-point was formed and final plastic strain value was determined as 3.9.

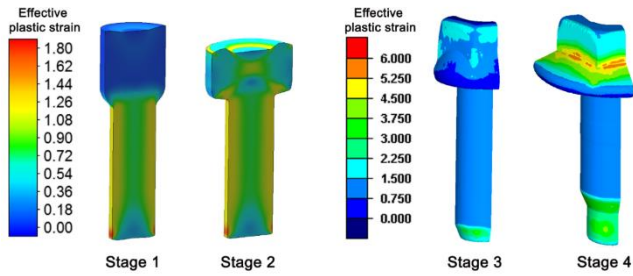


Figure 5. Distribution of effective plastic strain on forging stages.

Contact pressure during forging of bolt head is a critical parameter to determine the critical locations on the tools during forging. For that reason, distribution of contact pressure was determined during forging as shown in Figure 6(a). After socket was completely formed, material was forced to flow through radial direction to form flange at  $t_1$  time . During the formation, punch pushes the part into tool cavity and this leads to generation of excessive contact pressure on the dog-point section. In other words, dog-point section carries high percentage of forging load alone. Naturally, this leads significant increase of tensile stress on the weakest point of the tool which is the end radius as depicted in Figure 6(b). Comparison of simulated and failed tool is shown in Figure 6(c). As seen from the figure, cracking starts from the radius and propagated through the outer diameter of the insert as a result of tensile stress. Prediction of the stress distribution was seen well matched with actual failure of the tool.

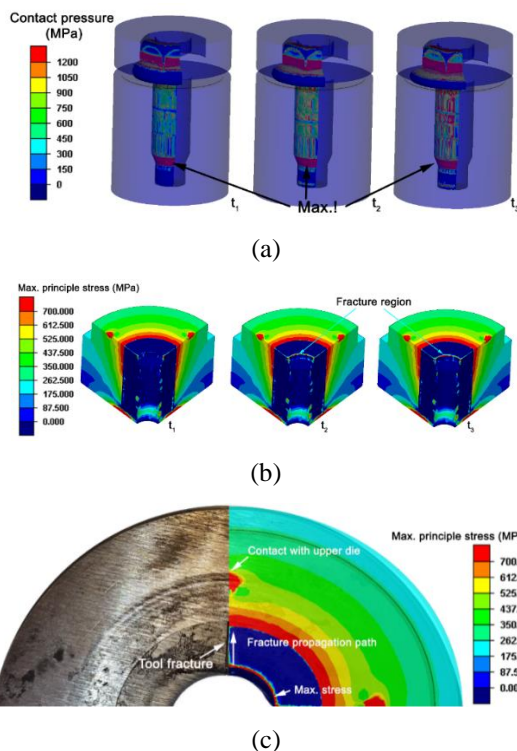


Figure 6. (a) Distribution of contact pressure at forging time of  $t_1$ ,  $t_2$  and  $t_3$  ( $t_1 < t_2 < t_3$ ), (b) max. principle stress

distribution on dog-point tool (no.4) and (b) and (c) comparison of failed and simulated tool at  $t_3$ .

As depicted in the above paragraph, contact pressure on the dog-point section during formation of flange and socket reached very high values,  $\sim 2500$  MPa which leads crack initiation on the tool radius. To eliminate that, forging stage designs of stage 4 and 5 were changed as shown in Figure 7(a). Here, the reduction on the shaft having  $26^\circ$  on stage 5 was shifted to stage 4 and the dog-point formation was shifted from stage 4 to stage 5. Forming simulations were repeated with changed stage designs and lap formation was detected under the head of the part on stage 5 as shown in Figure 7(b). It was seen that material cannot flow easily through dog-point reduction area and this causes to expand of the shaft diameter under the head. Furthermore, expanded part of the shaft buckled with increasing pressure and leads to lapping. In order to ease material flow on dog-point section on the die, preparation and dog-point angle was decreased to  $40^\circ$  from  $45^\circ$ . Simulation showed that lap formation was avoided with that design chance as depicted in Figure 7(c).

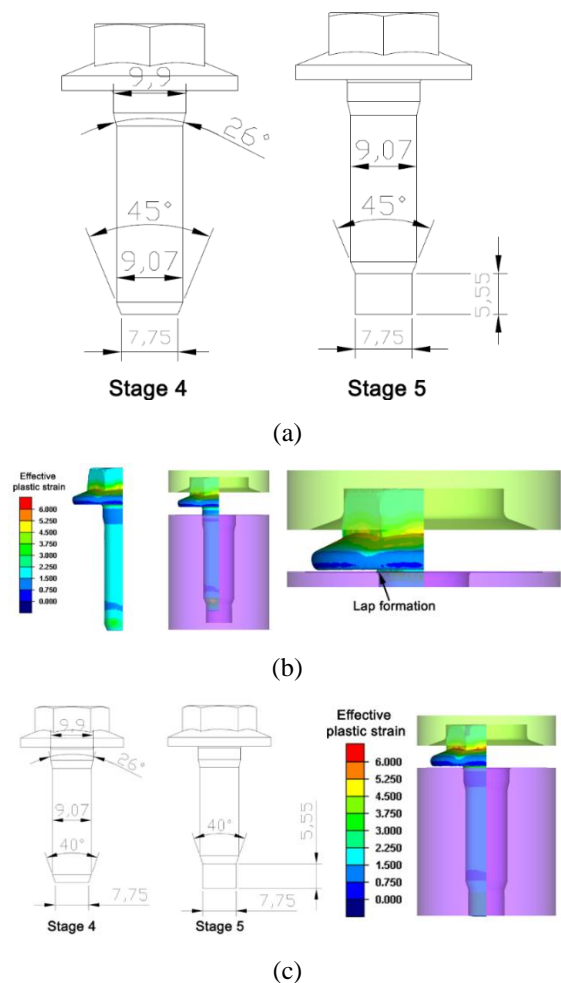


Figure 7. (a) Design chances on stage 4 and 5, (b) lap formation on stage 5, (c) final dimensions of stage 4 and 5 and formation of the part.

According to final design of stage 4 and stage 5 which are shown in Figure 7(c), tool stress analysis of stage 5 was carried out. At first, monolithic tool design was used as shown in Figure 8(a). In metal forging operations, tools are generally designed as monolithic. When tool failure occurs on some point, the tool is split from that point in which max. stress is generated. This tool design is called split design. Simulation showed that tool failed due to stress localization on the dog-point as depicted in Figure 8(b). Max. principle stress was found to be between 750 and 820 MPa on this location. In the further analysis, tool was split from the surface upper from dog-point section at 1.9 mm as shown in Figure 9(a). This method decreased the tool stress on dog-point to 175 between 250 MPa as depicted in Figure 9(b).

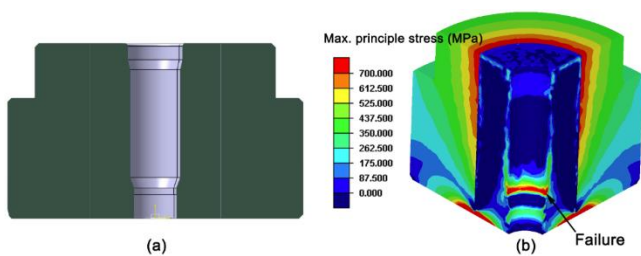


Figure 8. (a) Monolithic design of dog-point tool and (b) max. principle stress distribution.

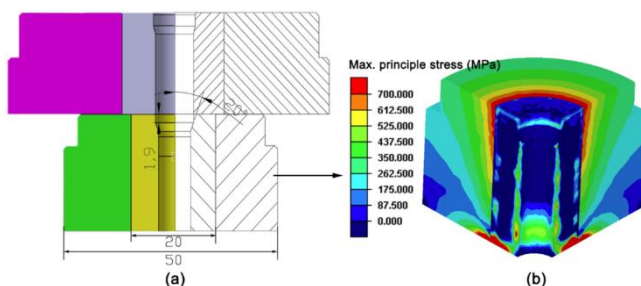


Figure 9. (a) Split insert design of dog-point tool and (b) max. principle stress distribution.

Bolt production with new tools were performed to investigate the effectiveness of the new design on tool life. Tool life before simulations was determined as 35,174 bolts per tool for forging of 1,000,000 bolts in production house. It was seen that 28 tools were failed during that production. This production costs extremely high due to tool cost, consumed energy and inactive time of the forging press during tool change. The life of new tools are shown in Figure 10 for forging of 1,500,000 bolts. Total of 11 tools were used and tool life was determined as 136,364 bolts/tool. This showed that tool life was increased about 3.8 times.

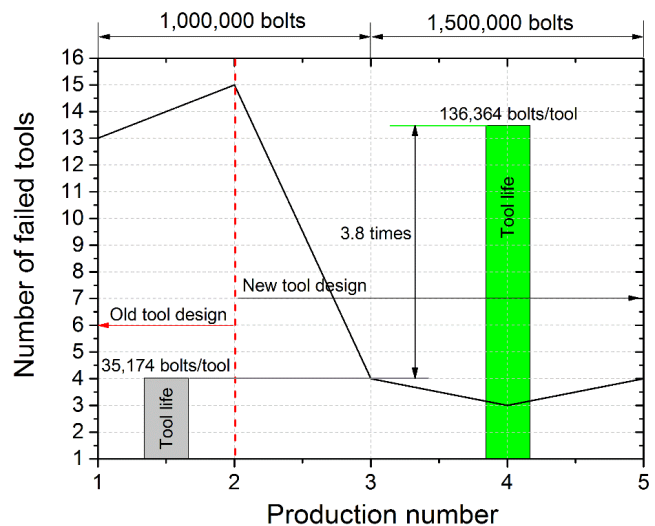


Figure 10. Comparison of tool life of old and new tools.



## 5. CONCLUSIONS

In the present study, multi-stage cold forging process of special M10x32 dog-point bolts was investigated numerically to analyze the reasons of tool failure and reveal the influences of forging stage design on tool life. Simulations showed that simultaneous forming of flange, socket of and dog-point section leads to generation of excessive contact pressure and tool fracture was triggered by high tensile stress. Flow of the material on dog-point section was found to be affected by reduction angle. While  $45^\circ$  dog-point angle slows the flow of material and causes expansion of shaft diameter and lap formation, forming problems were vanished with reduction of this angle to  $40^\circ$ . It was seen that tool stress can be reduced about 70% with proper modifications on forging stage designs which leads to increase of tool life 3.8 times in production..

## REFERENCES

- [1] T.-W. Ku and B.-S. Kang, "Tool design for inner race cold forging with skew-type cross ball grooves," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 214, no. 8, pp. 1482-1502, 8// 2014.
- [2] K. Wagner, A. Putz, and U. Engel, "Improvement of tool life in cold forging by locally optimized surfaces," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 177, no. 1-3, pp. 206-209, 2006.
- [3] B. He, "Failure and Protective Measures on Punch & Die for Cold Extrusion," presented

- at the *The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling*, 2012.
- [4] K. Andreas and M. Merklein, "Influence of Surface Integrity on the Tribological Performance of Cold Forging Tools," *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 61-66, 2014.
- [5] S.-Y. Hsia and P.-Y. Shih, "Wear Improvement of Tools in the Cold Forging Process for Long Hex Flange Nuts," *Materials*, vol. 8, no. 10, pp. 6640-6657, 2015.
- [6] P. Skov-Hansena, J. G. Niels Bayb, and P. Bründstedd, "Fatigue in cold-forging dies: tool life analysis," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 95, pp. 40-48, 1999.
- [7] S. Jhavar, C. P. Paul, and N. K. Jain, "Causes of failure and repairing options for dies and molds: A review," *Engineering Failure Analysis*, vol. 34, pp. 519-535, 12// 2013.
- [8] H. J. Bunge, K. Pöhlandt, A. E. Tekkaya, and D. Banabic, *Formability of Metallic Materials: Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits*. Berlin: Springer, 2000.
- [9] M. Geiger, M. Hansel, and T. Rebhan, "Improving the fatigue resistance of cold forging tools by FE simulation and computer aided die shape optimization," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 206, pp. 143-150, 1992.
- [10] H. Berns, A. Melander, D. Weichert, N. Asnafi, C. Broeckmann, and A. Groß-Weege, "A new material for cold forging tools," *Computational Materials Science*, vol. 11, no. 3, pp. 166-180, 5// 1998.
- [11] V. Vazquez, D. Hannan, and T. Altan, "Tool life in cold forging-an example of design improvement to increase service life," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 90-96, 2000.
- [12] U. Engel and U. Popp, "Microtexturing of Cold-Forging Tools - Influence on Tool Life," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 220, no. 1, pp. 27-33, 2006.
- [13] H. C. Lee, M. A. Saroosh, J. H. Song, and Y. T. Im, "The effect of shrink fitting ratios on tool life in bolt forming processes," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 8, pp. 3766-3775, 2009.
- [14] T.-W. Ku and B.-S. Kang, "Tool design and experimental verification for multi-stage cold forging process of the outer race," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 15, no. 9, pp. 1995-2004, 2014.
- [15] S. Yurtdaş, U. İnce, C. Kılıçaslan, and H. Yıldız, "A Case Study for Improving Tool Life In Cold Forging: Carbon Fiber Composite Reinforced Dies," *Research on Engineering Structures & Materials*, 2016.
- [16] K. Pöhlandt, "Testing tool materials for bulk metal forming," in *Materials testing for the metal forming industry*: Springer, 1989, p. 176.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 10.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 14.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.291234	

## Eksenel yönde tabakalı kirişlerin temel frekansı üzerinde tabaka dizilişinin etkileri

Savaş Evran<sup>\*1</sup>, Yasin Yılmaz<sup>2</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada eksenel yönde tabakalara sahip kirişlerin serbest titreşim davranışı üzerinde tabaka dizilişinin etkisi Timoshenko kiriş teorisine göre sonlu elemanlar programı (ANSYS) kullanılarak incelenmiştir. Her tabaka Alüminyum/Alüminyum oksit, Alüminyum/Zirkonyum ve Alüminyum/Nikel gibi farklı sistemlere sahiptir. Tabaka dizilişi Taguchi Metodunda L9 orthogonal dizi kullanılarak yürütülmüştür. Optimum tabaka dizilişini elde edebilmek için Taguchi Metodu ve optimum tabaka kombinasyonu kullanıldı. Yanıtlar üzerinde önemli tabakaları ve katkı yüzdelerini gerçekleştirebilmek için Varyans Analizi (ANOVA) kullanıldı. Sonuçlara göre yanıtlar üzerinde en etkili parametreler sırasıyla %67.94 ile Alüminyum/Alüminyum oksit, %31.08 ile Alüminyum/Nikel ve %0.95 ile Alüminyum/Zirkonyum için elde edilmiştir. İlk mod olarak da bilinen temel frekans değerleri tabakalardaki Alüminyum/Alüminyum oksit ve Alüminyum/Zirkonyum içeriklerinin artmasıyla artmış ve Alüminyum/Nikel içeriğinin artması ile azalmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Temel Frekans, Tabakalı Kiriş, ANSYS

### The effects of layer arrangements on fundamental frequency of layered beams in axial direction

### ABSTRACT

In this study, the influence of layer arrangements on free vibration behavior of beams which have layers in the axial direction is investigated according to Timoshenko Beam Theory by using finite element program (ANSYS). Each layer has different systems such as Aluminum/Alumina, Aluminum/Zirconia and Aluminum/Nickel. Layer arrangements are conducted using the L9 orthogonal array in Taguchi Method. In order to obtain the sorting order of optimum layers, Taguchi Method and optimum layer combination are utilized. Analysis of Variance (ANOVA) is used to carry out the significant layers and percentage of contribution on the responses. According to the results, the most effective parameters on the responses are obtained for Aluminum/Alumina with 67.94%, Aluminum/Nickel with 31.08% and Aluminum/Zirconia with 0.95%, respectively. Fundamental frequency values, also known as the first mode frequency values, increase with the increasing Aluminum/Alumina and Aluminum/Zirconia contents and decrease with the increasing Aluminum/Nickel content in layers.

**Keywords:** Fundamental Frequency, Layered Beams, ANSYS

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Canakkale Onsekiz Mart University, Vocational School of Canakkale Technical Sciences, sevrans@comu.edu.tr

<sup>2</sup> Pamukkale University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, yyilmaz@pau.edu.tr

## 1. INTRODUCTION

In engineering areas, free vibration behaviors of the beams are of great importance. There are many beams made of materials such as metal, ceramic, composite, polymer etc. for different usage environments. But beams fabricated using a single material may not be suitable for the ambient conditions. So beams produced depending on different usage rates of different materials may be needed. In the literature, there are many studies consist of free vibration analysis of different beam types. Chandrashekhara and Bangera [1] evaluated the free vibration analysis of laminated composite beams using a finite element model depended on a higher-order shear deformation theory. Li [2] presented a study about the free vibration analysis of beams, which have generally boundary conditions. Abbas [3] submitted a study consist of the free vibration analysis of Timoshenko beams according to elastically restrained ends. Lee and Ke [4] investigated of the problem consisting of the free vibration analysis of a non-uniform beam for general elastically restrained boundary conditions. Mao and Pietrzko [5] studied the free vibration analysis of a stepped Euler–Bernoulli beams which have two uniform sections according to Adomian decomposition method. Jang and Bert [6] presented a study dealing with the exact and numerical solutions of free vibration of stepped beams. Jaworski and Dowell [7] investigated the theoretical and experimental flexural-free vibration analysis of a cantilevered beam consisting of multiple cross-section steps. Ju *et al.* [8] published a study involving the free vibration analysis of stepped beams. Zheng and Kessissoglou [9] observed the study about the free vibrations of a cracked beam according to the finite element method. Kisa and Arif Gurel [10] presented the study consist of the free vibrations of stepped and uniform cracked beams which have circular cross sections. Chandrashekhara *et al.* [11] studied of the free vibration analysis of composite beams according to rotary inertia and shear deformation. Kapuria *et al.* [12] carried out the static and free vibration response of layered FGM beams consist of systems such as Al/SiC and Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. They used powder metallurgy for producing the layered FGM beams consist of Al/SiC and powder thermal spray processes for fabricating the layered FGM beams consist of Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Aydogdu and Taskin [13] determined

the free vibration of FG beams varied Young's modulus in the thickness direction for simply supported boundary conditions. Pradhan and Chakraverty [14] presented a study about the free vibration of Euler and Timoshenko functionally graded beams varied material properties in the thickness direction continuously for different sets of boundary conditions. Şimşek [15] evaluated the fundamental frequency analysis of functionally graded beams of which vary the material properties in the thickness direction continuously according to the power-law form under different boundary conditions depending on the different higher-order beam theories. Sina *et al.* [16] presented a study consist of the free vibration of functionally graded beams assumed to vary in the thickness direction according to a simple power law distribution in terms of volume fraction of material constituents under different boundary conditions. Alshorbagy *et al.* [17] evaluated the free vibration characteristics of and dynamic behavior of a functionally graded beam which have material graduation in axially or transversally in the thickness direction depended on the power law under various boundary conditions using finite element method numerically. Huang and Li [18] published a study consist of free vibration of axially functionally graded beams which have non-uniform cross-section with different boundary conditions. Şimşek [19] performed the vibration analysis of a functionally graded beam varied material properties in the thickness direction continuously based on the power-law form with simply-supported using Euler–Bernoulli, Timoshenko and the third order shear deformation beam theories under a moving mass. Yilmaz and Evran [20] produced axially layered functionally graded short beams having different Al/SiC content using powder metallurgy technique and investigated the free vibration behavior of the beams by using experimental and finite element methods. As can be seen from literature mentioned, there is no study consist of the effects of layer arrangements in free vibration analysis of axially layered beams using L9 orthogonal array based on Taguchi Method. The vibrations studied are the bending vibrations



## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Materials

In the study, the axially layered beams consist of three layers, totally. Each layer has different systems such as Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/ZrO<sub>2</sub> and Al/Ni and its content is modelled as 95%Al, 90%Al and %85Al which are in arithmetic fashion. The effective material properties P<sub>ef</sub> for each layer of the beams, such as Elasticity modulus E<sub>ef</sub> and mass density ρ<sub>ef</sub> are carried out using a simple rule of mixture of composite materials as given in Equation 1 [21]. Poisson’s ratio is taken to be constant.

$$P_{ef} = \sum_{k=1} P_k V_{fk} \tag{1}$$

P<sub>k</sub> and V<sub>fk</sub> in the equations are the material properties and volume fraction of the constituent material k respectively. The sum of the volume fractions of all the constituent materials also equal to one, i.e.,

$$\sum_{k=1} V_{fk} = 1 \tag{2}$$

Elasticity modulus, densities and poisson's ratios of Aluminium (Al), Alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), Zirconia (ZrO<sub>2</sub>) and Nickel (Ni) are given in Table 1. The effective material properties such as Elasticity modulus E<sub>ef</sub>, mass density ρ<sub>ef</sub> and poisson’s ratio value ν<sub>ef</sub> of the systems such as Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/ZrO<sub>2</sub> and Al/Ni are presented as Table 2 and these values were used to obtain optimum layer agreements for free vibration behavior of axially layered beams.

Table 1. Elasticity modulus, densities and poisson's ratios of Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> and Ni

Materials Properties	Materials			
	Al [22]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [22]	ZrO <sub>2</sub> [23]	Ni [24]
Elasticity modulus E (GPa)	70	380	151	199.5
Density ρ (kg/m <sup>3</sup> )	2707	3800	3000	8900
Poisson's ratios ν	0.3	0.3	0.3	0.3

Table 2. Elasticity modulus, densities and poisson's ratios of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/ZrO<sub>2</sub> and Al/Ni

Material Properties	Material Combinations								
	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			Al/ZrO <sub>2</sub>			Al/Ni		
	95% Al	90% Al	85% Al	95% Al	90% Al	85% Al	95% Al	90% Al	85% Al
Elasticity modulus E (GPa)	85.5	101	116.5	74.05	78.1	82.15	76.475	82.95	89.425
Density ρ (kg/m <sup>3</sup> )	2761.65	2816.3	2870.95	2721.65	2736.3	2750.95	3016.65	3326.3	3635.95
Poisson's Ratios ν (-)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3

### 2.2. Method

The purpose of this study is to carry out the effects of layer arrangements in free vibration analysis of axially layered beams and to determine the optimum layer arrangements. The analysis was performed by using L9 orthogonal array based on Taguchi Methodology. The orthogonal array

consist of 3 levels and 3 factors. Layers which have systems such as Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/ZrO<sub>2</sub> and Al/Ni were determined as control factors in the analysis. In order to obtain fundamental frequency values of the beams, materials properties of the systems in Table 2 was also used as control factors. Each factor has 3 different levels as shown in Table 3 and thus 9 analysis were performed as shown in Table 4.

Table 3. Control factors and their levels.

Code	Control Factors	Level 1	Level 2	Level 3
A	Layers consist of Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%95Al/%5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%90Al/%10Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%85Al/%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

B	Layers consist of Al/ZrO <sub>2</sub>	%95Al/%5ZrO <sub>2</sub>	%90Al/%10ZrO <sub>2</sub>	%85Al/%15ZrO <sub>2</sub>
C	Layers consist of Al/Ni	%95Al/%5Ni	%90Al/%10Ni	%85Al/%15Ni

In the Taguchi method, quality loss function is used for three characteristics such as the nominal-the-best, smaller-the-better, larger-the better [25]. Larger is the better characteristic as  $(S/N)_{LB}$  in the study is used as given by Equation 3 [26].

$$(S/N)_{LB} = -10 \cdot \log \left( n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i^2)^{-1} \right) \quad (3)$$

in which n shows number of analysis in a trial and  $y_i$  is observed ith data.

### 3. NUMERICAL ANALYSIS

Free vibration analysis are carried out using ANSYS finite element program according to Timoshenko Beam Theory. BEAM3 element type which has three degrees of freedom at each node: translations in the nodal x and y directions and

rotation about the nodal z-axis was used in the modelling to obtained fundamental frequencies. BEAM3 element in the ANSYS program is also a uniaxial element consist of tension, compression, and bending capabilities. It can be seen detailed information for the BEAM3 element using the ANSYS help menu. Shear deflection influence are often important in the lateral deflection of short beams and thus the value of shear deflection constant (SHEARZ) is defined for rectangle cross-section as 6/5. For the eigenvalue extraction, the Block Lanczos method was carried out. The beams have 10 mm cross section height, 12 mm cross section base and 60 mm length and layer sizes are equal each other. In addition, 20 elements where ANSYS for each layer are calculated. The analysis were performed under clamped-free boundary condition as shown in Figure 1.

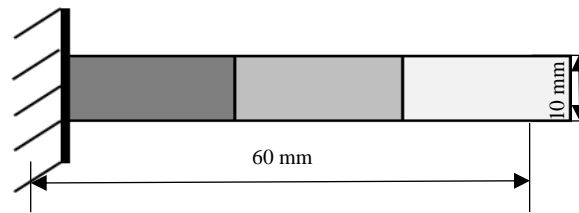


Figure 1. Axially layered beam with clamped-free boundary condition

### 4. RESULTS AND DISCUSSIONS

In order to obtain optimum result among fundamental frequency results of axially layered beams, MINITAB 15 packet program was used. S/N ratio values corresponding to the

fundamental frequency results are calculated by using Equation 3. Results obtained and S/N ratio values are given in Table 4 according to L9 orthogonal array. In addition, Table 4 shows that overall mean of the fundamental frequency results of all beam and the arithmetic mean of the results is in the interval of 2172.7 and 2628.0 Hz.

Table 4. Results and S/N ratio values of fundamental frequencies.

Test No	Designation	Control Factors			Results $\omega$ (Hz)	S/N Ratio $\eta$ (dB)
		A	B	C		
1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	%95Al/%5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%95Al/%5ZrO <sub>2</sub>	%95Al/%5Ni	2325.2	67.3292
2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	%95Al/%5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%90Al/%10ZrO <sub>2</sub>	%90Al/%10Ni	2244.6	67.0228
3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	%95Al/%5Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%85Al/%15ZrO <sub>2</sub>	%85Al/%15Ni	2172.7	66.7400
4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	%90Al/%10Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%95Al/%5ZrO <sub>2</sub>	%90Al/%10Ni	2379.2	67.5286
5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	%90Al/%10Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%90Al/%10ZrO <sub>2</sub>	%85Al/%15Ni	2305.3	67.2545
6	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	%90Al/%10Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%85Al/%15ZrO <sub>2</sub>	%95Al/%5Ni	2505.3	67.9772
7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	%85Al/%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%95Al/%5ZrO <sub>2</sub>	%85Al/%15Ni	2413.7	67.6537
8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	%85Al/%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%90Al/%10ZrO <sub>2</sub>	%95Al/%5Ni	2628.0	68.3925

9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	%85Al/%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%85Al/%15ZrO <sub>2</sub>	%90Al/%10Ni	2538.5	68.0915
Overall Mean					2390.3	

### 4.1. Effect on Free Vibration Analysis

In order to see the influence of control factors on free vibration analysis, tests were conducted using L9 orthogonal array. According to results obtained using ANSYS program in Table 4, the average values of fundamental frequencies for all of levels such as level 1, level 2 and level 3 of control factors for raw data are plotted in Figure 2. Figure 2 shows that fundamental frequencies increase with increase of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and ZrO<sub>2</sub> contents and decrease with the increasing Ni content in layers. Mechanical properties of each layer consist of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Al/ZrO<sub>2</sub> and Al/Ni systems increase depend on increase of contents such as

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> and Ni. This situation can be seen in Table 2 clearly. But layers with Al/Ni systems decrease fundamental frequencies of axially layered beams and has created the effect in the opposite direction according to layers consist of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al/ZrO<sub>2</sub>. Therefore, it can be said that increase of fundamental frequencies related to both mechanical properties such as Elasticity modulus and density and layer agreements.

### 4.2. Determination of Optimum Layers

In the Figure 2, optimum layers of axially layered beams are third level of layers with Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al/ZrO<sub>2</sub>, first level of layer consist of Al/Ni. These results can be seen from Table 5.

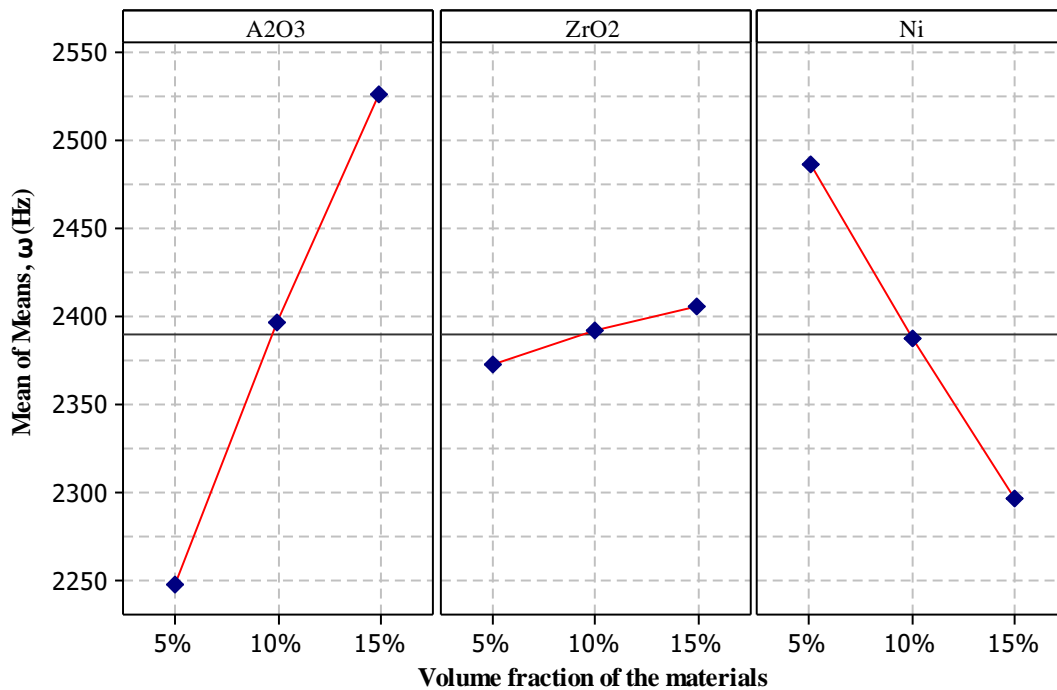


Figure 2. Main influence plots for fundamental frequencies

Table 5. Response table for fundamental frequencies

Level	S/N ratios (dB)			Means (Hz)		
	A	B	C	A	B	C
1	67.03	67.50	67.90 <sup>a</sup>	2247	2373	2486 <sup>a</sup>
2	67.59	67.56	67.55	2397	2393	2387
3	68.05 <sup>a</sup>	67.60 <sup>a</sup>	67.22	2527 <sup>a</sup>	2406 <sup>a</sup>	2297
Δ	1.02	0.10	0.68	279	33	189

Rank	1	3	2	1	3	2
------	---	---	---	---	---	---

<sup>a</sup> Optimum level, Δ = Difference between maximum and minimum values

Table 6. Analysis of Variance for fundamental frequencies (Raw Data)

Source	DF	Sum of squares	Variance	F	P	Cont. (%)
A	2	117137	58568	2548.54 <sup>a</sup>	0.000	67.94
B	2	1639	819	35.65 <sup>a</sup>	0.027	0.95
C	2	53580	26790	1165.74 <sup>a</sup>	0.001	31.08
Error	2	46	23			0.03
Total	8	172402				100

<sup>a</sup>Significant for 95% confidence level R-Sq = 99.97% R-Sq(adj) = 99.89%

In order to determine the effects of control factors on fundamental frequency results, analysis of variance (ANOVA) was performed. ANOVA results are given in Table 6. According to the table, all of layers have significant effect on fundamental frequency results in the 95% reliability interval. In addition, the most effective control parameter on results is obtained using layer with Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> which have 67.94% contribution ratio and other effective control parameters are layer made of Al/Ni with 31.08% contribution ratio and layer consist of Al/ZrO<sub>2</sub> with 0.95% contribution ratio, respectively.

### 4.3. Estimation of Optimum Fundamental Frequency

The optimum value of fundamental frequency is predicted at the optimal levels of significant variables such as level 3 of layer consist of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al/ZrO<sub>2</sub> and level 1 of layer made of Ni. The estimated mean of the response characteristic named fundamental frequency can be defined as Equation 4 [26].

$$\bar{\omega}_{Hz} = \bar{A}_3 + \bar{B}_3 + \bar{C}_1 - 2\bar{T}_{\omega Hz} \quad (4)$$

in which  $\bar{T} = 2390.3$  is overall mean of fundamental frequencies and is taken from Table 4. In addition, average values of fundamental frequencies at the third level of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and

Al/ZrO<sub>2</sub> are  $\bar{A}_3 = 2527$  and  $\bar{B}_3 = 2406$ , respectively. Also, average value of fundamental frequency at the first level of Ni is  $\bar{C}_1 = 2486$ . These values are taken from Table 5. 95% confidence intervals (CI) are calculated using Equation 5 [27].

$$CI_{\omega Hz} = \sqrt{F_{\alpha;1;n_2} V_{error} \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (5)$$

where,  $F_{0.05;1;2} = 18.513$  is taken from listed F values [26] according to 95% confidence intervals at DOF 1 and error DOF  $n_2$  and  $R=1$  is the repetition number for verification tests.  $V_{error} = 23$  is variance of error term and is taken from Table 6. Effective number of repetitions ( $n_{eff}$ ) is calculated as [27],

$$n_{eff} = N/[1+T_{DF}] \quad (6)$$

where,  $T_{DF} = 6$  and  $N = 9$  are sum of degrees of freedom for meaningful control parameters and total number of tests, respectively.  $T_{DF}$  value is also taken from Table 6. Hence  $n_{eff} = 1.2857$ . According to the values calculated for Equation 5,  $CI_{\omega Hz} = \pm 27.51$ . Estimation of optimum fundamental frequency for 95% CI is expressed as,

$$\bar{\omega}_{Hz} - CI_{\omega Hz} < \bar{\omega}_{Hz} < \bar{\omega}_{Hz} + CI_{\omega Hz} \quad (7)$$

Comparison of optimum results is shown in Table 7 for 95% confidence intervals.

Table 7. Comparison of optimum results

Optimum Level	Predicted Result	ANSYS Result	Predicted Confidence Intervals for 95% Confidence Level
	(Hz)	(Hz)	(Hz)
A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	2638.40	2643.60	2610.89 < $\bar{\omega}_{Hz}$ < 2665.91

#### 4.4. Regression Analysis

Regression technique was employed for estimating relationships among control parameters and fundamental frequencies results obtained using ANSYS program. In the equation, all control parameters were used since the p-value is larger than 0.05. Prediction model for R-Sq = 99.8% and R-Sq (adj) = 99.7% is shows as,

$$\omega_{Hz} = 2267 + 140Al/A_2O_3 + 16.4Al/ZrO_2 - 94.5 Al/Ni \quad (8)$$

in which, control factors such as Al/A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al/ZrO<sub>2</sub> have positive effect on fundamental frequency. But Al/Ni is has negative effect. In order words, increase of Al/A<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al/ZrO<sub>2</sub> increase fundamental frequency. Increase of Al/Ni also decrease. ANOVA result for regression analysis is presented in Table 8.

Table 8. ANOVA result for regression analysis

Source	DF	Sum of squares	Variance	F	P
Regression	3	172114	57371	998.78	0.000
Residual Error	5	287	57		
Total	8	172402			

#### 4.5. Optimum Layer Arrangements

In the study, free vibration behavior of axially layered beams consist of 3 layers is investigated. Each layer is made of different contents such as Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> and Ni. Optimum layers for fundamental frequency results are determined by using %85Al-%15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %85Al-%15ZrO<sub>2</sub>, and

% 95Al-% 5Ni, respectively. In order words, maximum fundamental frequency is obtained using these layers. In order to determine whether effect of the sorting order of optimum layers for fundamental frequency, different combination of these layers are analyzed by using ANSYS program. Different combinations of the layers are tabled in Table 9.

Table 9. Different combination of optimum layers

Beam Type	Beam Configurations			$\omega$ (Hz)
Type 1	%85Al-%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%85Al-%15ZrO <sub>2</sub>	% 95Al-% 5Ni	2643.6
Type 2	%85Al-%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 95Al-% 5Ni	%85Al-%15ZrO <sub>2</sub>	2702.1
Type 3	%85Al-%15ZrO <sub>2</sub>	%85Al-%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% 95Al-% 5Ni	2366.6
Type 4	%85Al-%15ZrO <sub>2</sub>	% 95Al-% 5Ni	%85Al-%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2326.8
Type 5	% 95Al-% 5Ni	%85Al-%15ZrO <sub>2</sub>	%85Al-%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2293.4
Type 6	% 95Al-% 5Ni	%85Al-%15Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%85Al-%15ZrO <sub>2</sub>	2380.9

According to results in Table 9, maximum fundamental frequency is obtained for Type 2 beam configuration which have %85Al-%15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %95Al-%5Ni and %85Al-%15ZrO<sub>2</sub>. This situation can be explained that layers have high contribution rate on fundamental frequency are located near the clamped end of the beam. In order words, increase of contribution rate of layers from clamped-end to free-end decrease fundamental frequency values. This condition can be monitored for Type 1 and Type 2 beam

configurations or Type 3 and Type 4 beam configurations or Type 5 and Type 6 beam configurations. The second highest fundamental frequency is obtained for Type 1 beam configuration with %85Al-%15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %85Al-%15ZrO<sub>2</sub> and % 95Al-% 5Ni. Type 1 beam configuration is determined according to Taguchi Methodology. Maximum fundamental frequencies obtained using Taguchi Methodology and optimum layer combinations are demonstrated as in Figure 3.

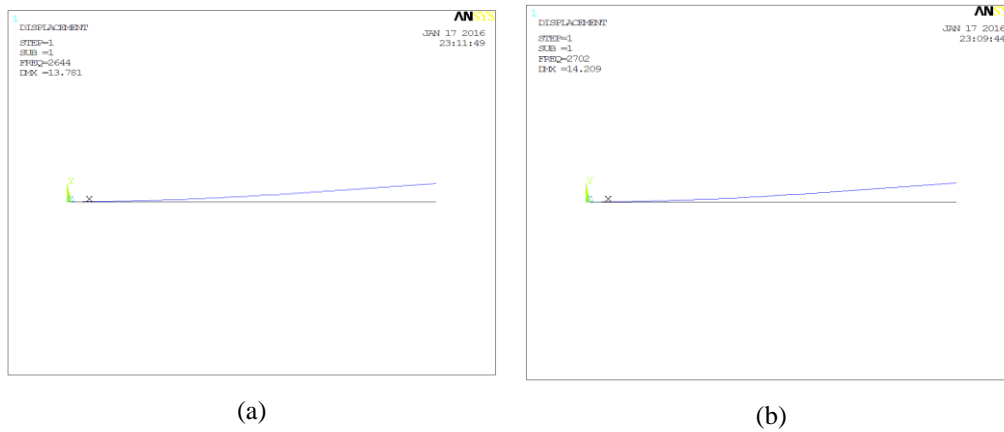


Figure 3. Maximum fundamental frequency as (a) Taguchi Methodology (Type1) and (b) Optimum layer arrangements (Type 2)

## 5. CONCLUSIONS

In the study, the influences of layer arrangements on free vibration behavior of layered beams in the axial direction are performed by using finite element program (ANSYS) for the theoretical prediction according to Timoshenko Beam Theory and the design of trials is conducted L9 orthogonal array, which is having 9 rows and 3 columns, based on Taguchi methodology. Based on the results obtained following generalized conclusions can be draw from the study:

1) Fundamental frequencies increase with increase of Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al/ZrO<sub>2</sub> contents and decrease with the increasing Al/Ni content in layers.

2) Contributions ratios of layers on fundamental frequency are Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with 67.94%, Al/Ni with 31.08% and Al/ZrO<sub>2</sub> with 0.95%, respectively.

3) Decrease of contribution ratios of layers from clamped end to free end increase the fundamental frequencies for clamp-free boundary condition.

4) Percent contribution of layers on fundamental frequency plays important role on layer arrangements.



5) Although maximum fundamental frequency is obtained using beam with %85Al-%15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %95Al-%5Ni and %85Al-%15ZrO<sub>2</sub> for optimum layer arrangement, maximum fundamental frequency according to Taguchi Methodology is determined for beam with %85Al-%15Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, %85Al-%15ZrO<sub>2</sub> and %95Al-%5Ni.

## REFERENCES

- [1] K. Chandrashekhara, and K.M. Bangera, "Free vibration of composite beams using a refined shear flexible beam element". *Computers & Structures*, vol. 43, no. 4, pp. 719-727, 1992.
- [2] W.L. Li, "Free Vibrations Of Beams With General Boundary Conditions". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 237, no. 4, pp. 709-725, 2000.
- [3] B.A.H. Abbas, "Vibrations of Timoshenko beams with elastically restrained ends". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 97, no. 4, pp. 541-548, 1984.
- [4] S.Y. Lee, and H.Y. Ke, "Free vibrations of a non-uniform beam with general elastically restrained boundary conditions". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 136, no. 3, pp. 425-437, 1990.
- [5] Q. Mao, and S. Pietrzko, "Free vibration analysis of stepped beams by using Adomian decomposition method". *Applied Mathematics and Computation*, vol. 217, no. 7, pp. 3429-3441, 2010.
- [6] S.K. Jang, and C.W. Bert, "Free vibration of stepped beams: Exact and numerical solutions". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 130, no. 2, pp. 342-346, 1989.
- [7] J.W. Jaworski, and E.H. Dowell, "Free vibration of a cantilevered beam with multiple steps: Comparison of several theoretical methods with experiment". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 312, no. 4-5, pp. 713-725, 2008.
- [8] F. Ju, H.P. Lee, and K.H. Lee, "On the free vibration of stepped beams". *International Journal of Solids and Structures*, vol. 31, no. 22, pp. 3125-3137, 1994.
- [9] D.Y. Zheng, and N.J. Kessissoglou, "Free vibration analysis of a cracked beam by finite element method". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 273, no. 3, pp. 457-475, 2004.
- [10] M. Kisa, and M. Arif Gurel, "Free vibration analysis of uniform and stepped cracked beams with circular cross sections". *International Journal of Engineering Science*, vol. 45, no. 2-8, pp. 364-380, 2007.
- [11] K. Chandrashekhara, K. Krishnamurthy, and S. Roy, "Free vibration of composite beams including rotary inertia and shear deformation". *Composite Structures*, vol. 14, no. 4, pp. 269-279, 1990.
- [12] S. Kapuria, M. Bhattacharyya, and A.N. Kumar, "Bending and free vibration response of layered functionally graded beams: A theoretical model and its experimental validation". *Composite Structures*, vol. 82, no. 3, pp. 390-402, 2008.
- [13] M. Aydogdu, and V. Taskin, "Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges". *Materials & Design*, vol. 28, no. 5, pp. 1651-1656, 2007.
- [14] K.K. Pradhan, and S. Chakraverty, "Free vibration of Euler and Timoshenko functionally graded beams by Rayleigh-Ritz method". *Composites Part B: Engineering*, vol. 51, no., pp. 175-184, 2013.
- [15] M. Şimşek, "Fundamental frequency analysis of functionally graded beams by using different higher-order beam theories". *Nuclear Engineering and Design*, vol. 240, no. 4, pp. 697-705, 2010.
- [16] S.A. Sina, H.M. Navazi, and H. Haddadpour, "An analytical method for free vibration analysis of functionally graded beams". *Materials & Design*, vol. 30, no. 3, pp. 741-747, 2009.
- [17] A.E. Alshorbagy, M.A. Eltaher, and F.F. Mahmoud, "Free vibration characteristics of a functionally graded beam by finite element method". *Applied Mathematical Modelling*, vol. 35, no. 1, pp. 412-425, 2011.
- [18] Y. Huang, and X.-F. Li, "A new approach for free vibration of axially functionally graded beams with non-uniform cross-section". *Journal of Sound and Vibration*, vol. 329, no. 11, pp. 2291-2303, 2010.
- [19] M. Şimşek, "Vibration analysis of a functionally graded beam under a moving mass by using different beam theories". *Composite Structures*, vol. 92, no. 4, pp. 904-917, 2010.
- [20] Y. Yilmaz, and S. Evran, Free vibration analysis of axially layered functionally graded short beams using experimental and finite element methods, *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 23, no. 4, pp. 453-460, 2015.
- [21] H.-S. Shen, "Functionally graded materials: nonlinear analysis of plates and shells", CRC press, 2009.
- [22] G.M.S. Bernardo, F.R. Damásio, T.A.N. Silva, and M.A.R. Loja, "A study on the structural behaviour of FGM plates static and free vibrations analyses". *Composite Structures*, vol. 136, no., pp. 124-138, 2016.

- [23] G.N. Praveen, and J.N. Reddy, "Nonlinear transient thermoelastic analysis of functionally graded ceramic-metal plates". *International Journal of Solids and Structures*, vol. 35, no. 33, pp. 4457-4476, 1998.
- [24] J.R. Cho, and J.T. Oden, "Functionally graded material: a parametric study on thermal-stress characteristics using the Crank–Nicolson–Galerkin scheme". *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 188, no. 1–3, pp. 17-38, 2000.
- [25] G. Taguchi, S. Chowdhury, and Y. Wu, "Taguchi's Quality Engineering Handbook", Wiley, 2005.
- [26] R.K. Roy, "A primer on the Taguchi method", Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [27] P.J. Ross, "Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design", McGraw-Hill, 1996.



	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 18.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 14.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.298755	

## Ön gerilmeli monotron tipi halatın deneysel ve teorik doğal frekans analizi

Cihan Demir<sup>\*1</sup>, Erkan Ala<sup>2</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada farklı çaplara sahip farklı tiplerdeki tek helis açısına sahip ön gerilmeli monotron halatların doğal frekans analizi teorik ve deneysel olarak yapılmıştır. Teorik analizde daha önce çıkartılmış analitik formüllerden yararlanılmıştır. Bununla birlikte halat katı modeli oluşturularak sonlu elemanlar yöntemi ile doğal frekans analizi yapılmıştır. Deneysel çalışmada, ön gerilmeli kablunun basit mesnetli sınır şartları oluşturularak çeşitli yükler altında darbe çekici ile doğal frekans analizi gerçekleştirilmiştir. Deneysel ve teorik analizlerin sonuçları değerlendirilerek, halat doğal frekansının uygulanan ön gerilme kuvveti altında, halat çapına ve tel sayısına bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** ön gerilmeli monotron halat, doğal frekans, sonlu elemanlar yöntemi

## Theoretical and experimental analysis of prestressed monotron type wire rope

### ABSTRACT

Natural frequency analysis of prestressed monotron ropes with single helix angles of different types with different diameters was theoretically and experimentally performed in this study. Analytical formulas have been used in the theoretical analysis. In addition to this, the solid model of rope was created and natural frequency analysis was performed by the finite element method. In the experimental study, the natural frequency analysis was carried out by using the impulse hammer under various loads by establishing simple supported boundary conditions of the prestressed cable. The results of the experimental and theoretical analyzes were evaluated to determine how the natural frequency of the rope changes under the pretension stress applied, depending on the diameter of the rope and the number of wires.

**Keywords:** prestressed monotron type wire rope, natural frequency, finite element method

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul – cdemir@yildiz.edu.tr

<sup>2</sup> Yıldız Teknik Üniversitesi Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İstanbul – erkna@gmail.com

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tel halatlar pek çok mühendislik uygulamasında yüksek dayanım/ağırlık oranları nedeniyle kullanılmaktadır. Büyük açıklığa sahip asma köprüler, stadyum çatıları, teleferik hatları ve vinçler gibi pek çok farklı alanda kullanılmaktadır.

Halatlarda yük taşıma kapasitesi teller arasında dağıtılmaktadır ve bunun iki faydası bulunmaktadır. Yüksek eksenel dayanım ve rijitlik ile eğilme esnekliğinin birleşimi sağlanmaktadır. Böylece esas olarak yerel kırılmalardan korunmak için yapıyı bölerek çeliğin yüksek gerilme değerlerinde kullanımına izin verir. Özellikle tellerin kırılması durumunda yerel hasarların telafi edilmesi bakımından tel halatın tokluğunun sağlanması önemlidir. Yükün halat içindeki çok sayıda tele dağıtılması nedeniyle işletme emniyeti oldukça yüksektir. Kendi ağırlıklarıyla taşıma kapasiteleri arasında uygun bir oran mevcuttur ve büyük bir elastik uzama miktarına sahiptirler. İşletme sırasında kolaylıkla gözle kontrol edilebilmeleri mümkündür [1].

Tel halatlar kullanıldıkları yapıda emniyet açısından kritik öneme sahip elemanlardır. Kablo yapılarının montajı ve bakımı esnasında uygulanacak gergi kuvvetinin doğru tespit edilmesi yapının emniyeti ve sağlıklı bir şekilde kullanımı açısından önemlidir. Kablolardaki gergi kuvvetinin tespiti statik ve dinamik yöntemler olmak üzere 2 farklı yöntemle yapılmaktadır. Statik metotta yük hücresi kullanılarak halatın gerinim ölçülmesi yapılarak buradan gergi kuvveti hesaplanmaktadır. Dinamik metotta ise kabloların titreşim frekansı ivmeölçer yardımıyla ölçülmektedir ve frekans değeri kullanılarak gergi kuvveti analitik formüle göre hesaplanmaktadır.

Tel halatların modellenmesi ve analizi ile ilgili daha önce pek çok çalışma yapılmıştır. Jiang vd. [2] tarafından yapılan çalışmada, eksenel yük altındaki tel halatın davranışını ve gerilmelerin dağılımını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemiştir. Sonlu elemanlar modelini basitleştirmek için halatın simetrik küçük bir parçasının analizi yapılmıştır. Ghoreishi vd.[3] tarafından yapılan çalışmada basit düz tel demetlerin eksenel yük altındaki davranışını incelemek için geliştirilen analitik modeller ve daha önceden elde edilmiş olan deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Spak vd.[4] tel halatların davranışını incelemek için

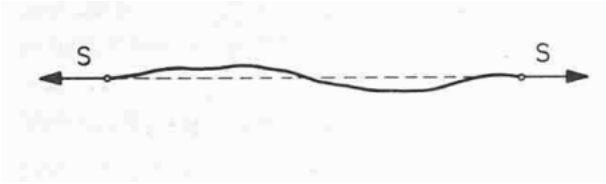
geliştirilen ince çubuk modeli, yarı sürekli model ve kiriş modeli olmak üzere 3 ana modelleme yaklaşımı incelenmiş ve bunların karşılaştırılması yapılmıştır. Stanova vd.[5-6] tel halatların geometrik modellerinin geliştirilmesi için gerekli olan matematiksel modelleri hem çift helis açısına sahip hem de tek helis açısına sahip halatlar için çıkarmıştır. Bu matematiksel model kullanılarak halatın katı modeli ve sonlu elemanlar modelini oluşturmuştur. Eksenel yük altında halatın analizi sonlu elemanlar analizi yapılmıştır ve deneysel ve teorik verilerle karşılaştırılmıştır. Wu [7] tarafından yapılan çalışmada spiral halatların katmanlarının sarım yönlerinin farklı olduğu 3 halat modelinin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Halatların eksenel yük altında sarım yönlerinin değişmesiyle değişen özellikleri incelenmiştir. Yu vd.[8] tek helis açısına 7 telden oluşan monoton halat için yanal ve eksenel yükleme durumlarında halatların temas bölgelerindeki davranışını incelemek için sonlu elemanlar analizi yapmıştır. Feyrer [9], tel halatların sınıflandırılmasını, testlerinin ve test düzeneklerinin nasıl yapılması gerektiğini ve halatlarla ilgili önemli parametrelerin teorik olarak nasıl hesaplanacağını göstermiştir. Çekme yükü, eğilme yükü ve burulmada gerilmelerin hesaplanması, elastiklik modülünün hesaplanması, tork ve halatın makara üzerindeki hareketinde halat veriminin hesaplanmasını teorik denklemlerle ve uygulamalarla göstermiştir.

Bu çalışmada farklı çaplara sahip farklı tiplerdeki tek helis açısına sahip monoton halatların doğal frekans analizi teorik ve deneysel olarak yapılmıştır. Teorik analizde analitik formüllerden ve sonlu elemanlar yönteminden faydalanılmıştır. Halat katı modeli Catia yazılımında oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu katı model Ansys Workbench programına aktarılmıştır ve sonlu elemanlar analizi yapılmıştır. Sonlu elemanlar yönteminde teller arasındaki ilişki tam bağlı, eksenel yönde bağlı, sürtünmeli bağlantı (bonded, no separation, frictional) kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada ise sonlu elemanlar analizinde kurulan sınır şartlarının benzeri laboratuvar ortamında oluşturulmuştur. Deneysel ve teorik analizlerin sonuçları değerlendirilerek halat doğal frekansının uygulanan ön gerilme kuvveti altında halat çapına ve tel sayısına bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiştir.

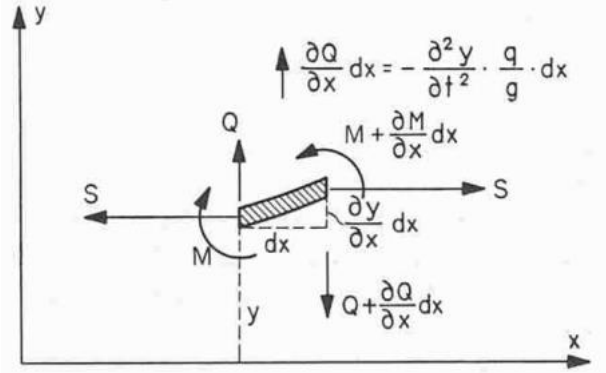
## 2. ANALİTİK MODELLEME (ANALYTICAL MODELLING)

Şekil 1’de görülen ön gerilmeli halat üzerinde oluşan bir dalga için hız ifadesinin çıkarılması gösterilecektir. Daha sonra bu ifade kullanılarak ön gerilmeli bir halatın doğal frekanslarını gösteren denklem elde edilecektir. [10]

Denge konumunda küçük sapmaları olan S kuvveti ile gerilmiş bir tel halatın sonsuz küçük bir parçası üzerinde D’Alembert prensibine göre denge denklemleri çıkarılabilir. Halat parçasına etkiyen kuvvet ve momentler şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Uç noktalardan gerilme uygulanan halat modeli [10]



Şekil 2. Halat üzerinde oluşan kuvvetler ve momentler [10]

Burada Q, M ve  $\frac{q}{g}$  ifadeleri sırasıyla halat parçası üzerindeki kesme kuvveti, eğilme momenti ve birim uzunluğun kütesini göstermektedir. Eğilme momenti ve halat eğilme katılığı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$M = IE \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (1)$$

Kesme kuvvetindeki büyüme sadece atalet kuvvetinden kaynaklanır.

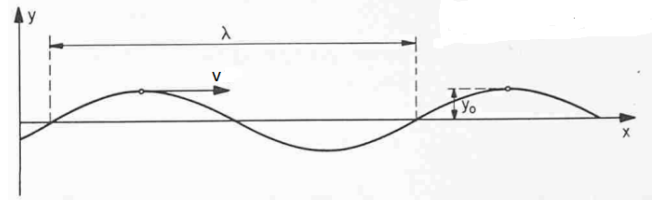
$$\frac{\partial Q}{\partial x} dx = -\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \frac{q}{g} dx \quad (2)$$

Birim halat elemanı için moment denge denklemine şekil 2’den faydalanılarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\frac{\partial M}{\partial x} - Q dx - S \frac{\partial y}{\partial x} dx = 0 \quad (3)$$

Denklem (3)’deki kesme kuvveti ve eğilme momenti ifadeleri yerine denklem (1) ve denklem (2)’deki ifadeleri yazılırsa tel halat hareketinin diferansiyel denklemi bulunur.

$$\frac{q}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + IE \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} - S \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$



Şekil 3. Halat üzerinde oluşan dalganın anlık gösterimi [10]

Tel halat üzerinde hareket eden bir dalganın anlık durumu şekil 3’te gösterilmiştir. Burada v dalga hızını,  $y_0$  dalga yüksekliğini ve  $\lambda$  dalga boyunu göstermektedir.

$$y = y_0 \sin \frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \quad (5)$$

Halat hareketini gösteren diferansiyel denklem (4)’de y ifadesi yerine denklem (5) yazıldığında halat üzerinde oluşan enine bir dalganın hızı şu şekilde formüle edilebilir:

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot S}{q} \left[ 1 + \frac{E \cdot I}{S} \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^2 \right]} \quad (6)$$

v: Dalga hızı [m/s]

S: Halattaki gerilme kuvveti [N]

g: Yer çekimi ivmesi [m/s<sup>2</sup>]

I: Eylemsizlik momenti [m<sup>4</sup>]

$\lambda$ : Dalga boyu [m]

q: Halatın birim uzunluğunun ağırlığı [N/m]

E: Elastisite modülü [N/m<sup>2</sup>]

Halat dalga boyu büyük ve homojen olduğunda eğilme katılığının (E.I) etkisi çok küçüktür ve ihmal edilebilir.[9] Hız formülü bu basitleştirmeyle şu şekilde yazılabilir:

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot S}{q}} \quad (7)$$

Halatın birim uzunluğunun kütlesi  $m_r = \frac{q}{g}$  olarak

yazılırsa hız formülü;

$$v = \sqrt{\frac{S}{m_r}} \quad (8)$$

Halatta oluşan dalganın hızı ölçülen zaman aralığında (t) halat uzunluğu (L) ve döngü sayısı (n) kullanılarak şu şekilde de bulunabilir:

$$v = \frac{2.n.L}{t} \quad (9)$$

Enine dalga ile ilerleme zamanı bir dalga için denklem (9) kullanılarak yazılırsa;

$$t = \frac{2.L}{v} \quad (n=1) \quad v = \sqrt{\frac{S}{m_r}} \quad \text{ve olduğu için bir dalga}$$

için ilerleme zamanı elde edilir:

$$t = 2.L \sqrt{\frac{m_r}{S}} \quad (10)$$

Durgun bir dalga için periyodu

$$T = \frac{t}{i} \quad (11)$$

Burada  $i$  halat uzunluğu boyunca oluşan dalga karnı (antinode) sayısıdır ve halatın mod şekline göre dalga karnı sayısının değişimi ilk 5 mod şekli için Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu ifade ilerleme zamanı formülünde yerine konulursa dalga için periyodu aşağıdaki şekilde bulunur:

$$T = \frac{2.L}{i} \sqrt{\frac{m_r}{S}} \quad (12)$$

Dalga için frekans periyot ifadesinden elde edilebilir:

$$(f = \frac{1}{T}) \quad f = \frac{i}{2.L} \sqrt{\frac{S}{m_r}} \quad (13)$$

$f$ : Halatta oluşan titreşimin frekansı [Hz]

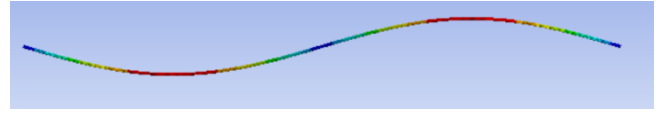
$L$ : Halatın uzunluğu [m]

$S$ : Gerilme kuvveti [N]

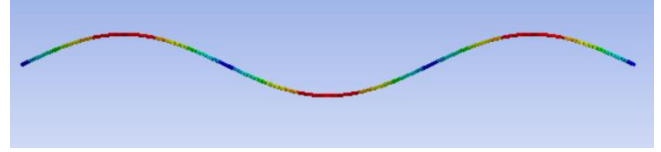
$m_r$ : Halatın birim uzunluğunun kütlesi [kg/m]



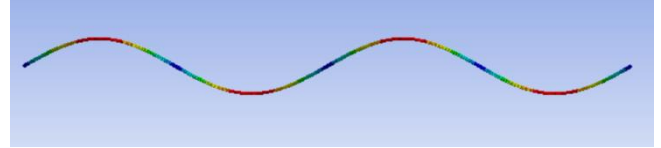
1.Mod Şekli (1. Mode Shape)



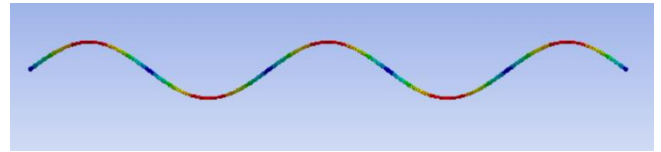
2.Mod Şekli (2. Mode Shape)



3.Mod Şekli (3. Mode Shape)



4.Mod Şekli (4. Mode Shape)



5.Mod Şekli (5. Mode Shape)

Şekil 4. Halata ait ilk 5 mod şekli

### 3. SONLU ELEMANLAR MODELİNİN OLUŞTURULMASI (GENERATION OF FINITE ELEMENT MODEL)

Sonlu elemanlar modeli oluşturulan halat modellerinin tamamı tek helis açısına sahip monoton halat tipindedir. Halatların 500 mm uzunluğundaki modeli katı modelleme programında oluşturulduktan sonra step dosya formatında sonlu elemanlar analizi için Ansys Workbench programına aktarılmıştır. Katı modellerin uzunluklarının deney numunelerinin uzunluklarıyla aynı olması için bazı düzenlemeler Ansys Workbench'deki Design Modeler uygulamasında yapılmıştır. Tüm modellerin ilk önce Ansys içerisindeki Static Structural bölümünde statik analizi yapılmıştır. Daha sonra burada elde edilen veriler Modal bölümüne aktarılmıştır ve halatların ön gerilmeli doğal frekans değerleri elde edilmiştir. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması ile ilgili ayrıntılar bu bölümde anlatılacaktır.

#### 3.1. Halat Katı Modelinin Oluşturulması (Generation of Wire Rope Solid Model)

Bu çalışmada sonlu elemanlar analizi için gerekli olan halat katı modeli oluşturulurken Stanova vd. [5-6] tarafından yapılan çalışmadan

faýdalanılmıştır. Halat tiplerinde kullanılan ikinci sayı halattaki toplam tel sayısını göstermektedir. Örneğin 1x7 monoton halatta 7 adet tel bulunmaktadır. Katı modeli oluşturulan halat modelleri şunlardır:

- 1x7 3 mm çapında monoton halat
- 1x7 5 mm çapında monoton halat
- 1x7 8 mm çapında monoton halat
- 1x19 3 mm çapında monoton halat
- 1x19 5 mm çapında monoton halat
- 1x19 8 mm çapında monoton halat
- 1x37 5 mm çapında monoton halat

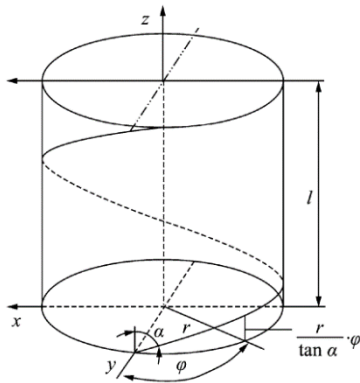
Aşağıda monoton halat tipindeki tek helis açısına sahip bir halatın tellerinin merkezinden geçen eksenini ifade eden parametrik denklemler genel olarak gösterilmiştir. Bu çalışmada analizi yapılan tüm halatların parametrik denklemleri çizelge 1’de gösterilmiştir.

Monoton halatın herhangi bir katmanındaki bir telin merkez ekseninden geçen eğriyi gösteren parametrik denklemler şunlardır:

$$x(\phi) = r_j \cdot \cos(\gamma + \xi + q \cdot \phi) \quad (14)$$

$$y(\phi) = r_j \cdot \sin(\gamma + \xi + q \cdot \phi) \quad (15)$$

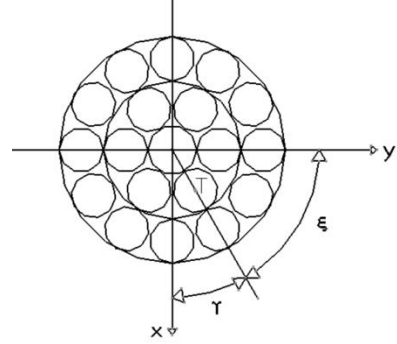
$$z(\phi) = \frac{\phi \cdot r_j}{\tan \alpha_j} \quad (16)$$



Şekil 5. Parametrik denklemde kullanılan  $\alpha$  ve  $\phi$  açıları [9]

Burada  $\phi$  halat telinin merkez eksenini gösteren eğrideki noktaların z eksenini etrafındaki dönme açısıdır.  $\alpha_j$  halatın herhangi bir katmanının sarım açısıdır.  $q$  halat katmanındaki tellerinin sarım yönünü gösteren katsayıdır. Sağ dönüşlü halatlar için  $q=1$ , sola dönüşlü halatlar için  $q=-1$ ’dir.  $\xi$  halatın herhangi bir katmanındaki herhangi iki telin merkez eksenleri arasındaki açıdır.  $\gamma$  herhangi

bir katmandaki oluşturulan ilk telin merkez ekseninin x eksenini ile yaptığı açıdır. Şekil 5’de örnek bir halat için  $\xi$  ve  $\gamma$  açıları gösterilmiştir.

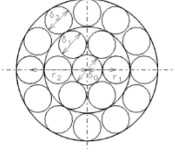
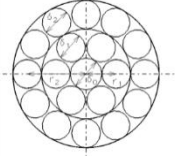
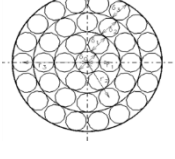


Şekil 6. Parametrik denklemde kullanılan  $\xi$  ve  $\gamma$  açıları

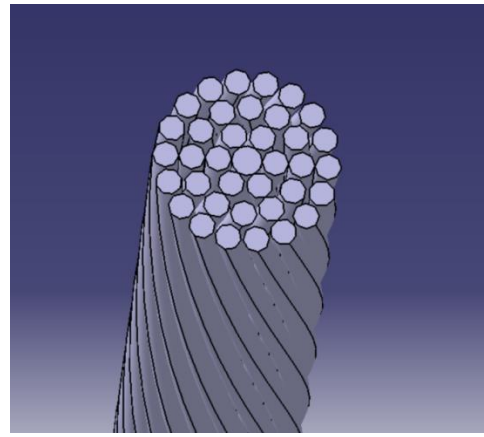
$\delta_j$  halatın herhangi bir katmanındaki telin çapını ve  $r_j$  de halatın herhangi bir katmanının sarım yarıçapını göstermektedir. Alt indis j katman numarasını göstermektedir.

Çizelge 1. Halat katı modellerinin parametrik denklemleri

Halat Tipi	Katman Numarası	Parametrik Denklemler	Halat Kesiti (Halat tel çapları $(\delta_0, \delta_1, \delta_3)$ ve sarım yarıçapları $(r_1, r_2, r_3)$ )
1x7 3 mm Monoton Halat	1	$x(\phi) = r_1 \cdot \cos(-20,180)$ $y(\phi) = r_1 \cdot \sin(-20,180)$ $z(\phi) = \frac{20,180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_1}{\tan(6,67)}$	
1x 7 5 mm Monoton Halat	1	$x(\phi) = r_1 \cdot \cos(12,5,180)$ $y(\phi) = r_1 \cdot \sin(12,5,180)$ $z(\phi) = \frac{12,5,180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_1}{\tan(7,52)}$	
1x7 8 mm Monoton Halat	1	$x(\phi) = r_1 \cdot \cos(-12,5,180)$ $y(\phi) = r_1 \cdot \sin(-12,5,180)$ $z(\phi) = \frac{12,5,180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_1}{\tan(11,84)}$	
1x19 3mm Monoton Halat	1	$x(\phi) = r_1 \cdot \cos(55,56,180)$ $y(\phi) = r_1 \cdot \sin(55,56,180)$ $z(\phi) = \frac{55,56,180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_1}{\tan(12,21)}$	
	2	$x(\phi) = r_2 \cdot \cos(-55,56,180)$ $y(\phi) = r_2 \cdot \sin(-55,56,180)$	

			$z(\phi) = \frac{55,56.180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_2}{\tan(12,21)}$	
1x19 5mm Monotron Halat	1	$x(\phi) = r_1 \cdot \cos(-25.180)$		
		$y(\phi) = r_1 \cdot \sin(-25.180)$	$z(\phi) = \frac{25.180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_1}{\tan(9,1)}$	
		$x(\phi) = r_2 \cdot \cos(12,44.180)$		
		$y(\phi) = r_2 \cdot \sin(12,44.180)$		
	2		$z(\phi) = \frac{12,44.180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_2}{\tan(9,1)}$	
1x19 8mm Monotron Halat	1	$x(\phi) = r_1 \cdot \cos(20,84.180)$		
		$y(\phi) = r_1 \cdot \sin(20,84.180)$	$z(\phi) = \frac{20,84.180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_1}{\tan(12,25)}$	
		$x(\phi) = r_2 \cdot \cos(-10,67.180)$		
		$y(\phi) = r_2 \cdot \sin(-10,67.180)$		
	2		$z(\phi) = \frac{10,67.180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_2}{\tan(12,25)}$	
1x37 5mm Monotron Halat	1	$x(\phi) = r_1 \cdot \cos(-94.180)$		
		$y(\phi) = r_1 \cdot \sin(-94.180)$	$z(\phi) = \frac{94.180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_1}{\tan(12,71)}$	
		$x(\phi) = r_2 \cdot \cos(48,752.180)$		
		$y(\phi) = r_2 \cdot \sin(48,752.180)$		
	2		$z(\phi) = \frac{48,752.180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_2}{\tan(12,71)}$	
		$x(\phi) = r_3 \cdot \cos(-32,91.180)$		
		$y(\phi) = r_3 \cdot \sin(-32,91.180)$		
	3		$z(\phi) = \frac{32,91.180 \cdot \frac{\pi}{180} \cdot r_3}{\tan(12,71)}$	

Çizelge 1’de gösterilen parametrik denklemler katı model yazılımına aktarılıp halatı oluşturan tellerin merkezinden geçen helisel eğri elde edilmiştir. Tel çapına göre eğrilere kesit atanarak tellerin ve halatın katı modeli elde edilmiştir. 1x37 5 mm tipindeki monotron halatın katı modeli şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 7. 1x37 5 mm halat için katı modeli

### 3.2. Malzeme Özellikleri (Material Properties)

Sonlu elemanlar analizinde uygulanacak yükler ve sınır şartlarından dolayı halatta oluşacak şekil değişimlerinin elastik olacağı teorik formüllerden öngörülmüştür. Bu yüzden seçilecek malzemenin gerilme gerinim ilişkisinin lineer olduğu Ansys Workbench malzeme kütüphanesindeki yapısal çelik seçilmiştir. Malzemenin elastiklik modülü 200 GPa, Poisson oranı 0,3 ve öz kütlesi 7850 kg/m<sup>3</sup> dür. Analizi yapılan tüm sonlu elemanlar modelleri homojen, izotropik ve doğrusal malzeme özellikleri taşımaktadır. Deneyde kullanılan halatlar yüksek karbonlu (karbon oranı % 0,65) ve alaşımsız çelikten üretilmiştir. Halat numunelerinin özellikleri halat imalatçısı firma olan Köşkerler Halat’tan alınmıştır. Deneyde kullanılan halat numunelerinin mekanik özellikleriyle sonlu elemanlar analizinde kabul edilen mekanik özellikler birbirleriyle uyumludur.

### 3.3. Temas Özellikleri (Contact Properties)

Deneyde kullanılan çelik halatta çelik teller arasında sürtünme vardır. Sonlu elemanlar analizinde de bu sürtünme tanımlanmalıdır. Sürtünmeli temas tanımlanması analizin lineer olmamasına neden olmaktadır ve çözüm süresini uzatmaktadır. Katı modeldeki tellerin çapı çok küçük (0,82 mm, 0,65 mm gibi) olduğu için analizde kullanılacak eleman büyüklüğünün de çok küçük olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle 500 mm uzunluğundaki bir modelde kullanılan eleman sayısı artmaktadır. Modeldeki eleman ve temas sayısının fazla olması ve analiz sırasında farklı tipteki birçok gerilme türünün birlikte ortaya çıkması nedeniyle laboratuvarında kullanılan bilgisayarların çözüm kapasitesi yetmemektedir. Bu problemten dolayı halat katı modellerinden en küçük çapta ve temas bölgesi sayısı en az olan

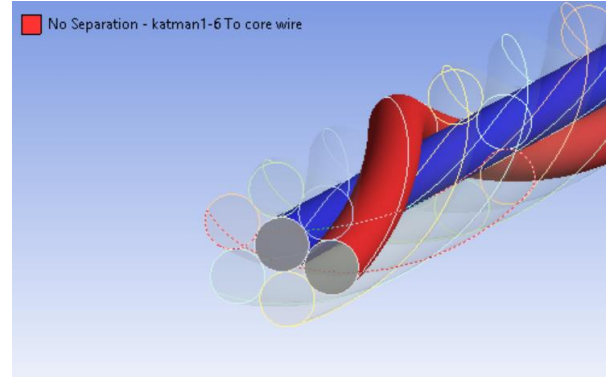
model için Ansys'de bulunan sürtünmeli temas (frictional contact), ayrılmasız temas (no separation contact) ve yapışık temas (bonded contact) temas tipleri ile ayrı ayrı halat analizleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. 500 mm uzunluğundaki 1x7 3 mm monoton halat için 500 N gergi kuvveti altında ayrılmasız ve yapışık temas tiplerinin sürtünmeli temas modelleri karşılaştırılması sırasıyla çizelge 2 ve çizelge 3'de gösterilmiştir. Sonuçların birbirine yakın çıkması nedeniyle katı modeldeki teller ayrılmasız temas seçeneği ile tanımlanmıştır. Ayrılmasız temas seçeneğinde birbirine temas eden yüzeylerdeki düğüm noktaları sadece yüzeyin normali yönünde birleştirilir. Temas yüzeyleri teğet yönünde küçük kaymalara izin verir. Bu durum ayrılmasız temas içeren modellerin sürtünmeli temas içeren modelde olduğu tel halatların birbiri üzerinden bir miktar kaymasına izin vermektedir. Sonuçlar bu nedenle sürtünmeli temas içeren modele yakın çıkmaktadır. Birbirine temas halinde olan iki yüzeyin Ansys programındaki gösterimi şekil 7'de görülmektedir.

Çizelge 2. Sürtünmeli temas ve ayrılmasız temas tanımlı modellerin doğal frekans değerleri karşılaştırılması

Sürtünmeli Temas Tanımlı Model Doğal Frekans Değerleri (Hz)	Ayrılmasız Temas Tanımlı Model Doğal Frekans Değerleri (Hz)	% Fark
116,13	116,28	0,13
234,02	234,04	0,15
355,36	354,71	0,20
481,95	479,69	0,27
615,41	610,26	0,34

Çizelge 3. Sürtünmeli temas ve yapışık temas tanımlı modellerin doğal frekans değerleri karşılaştırılması

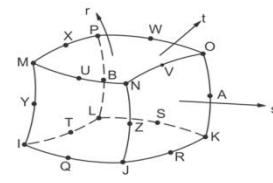
Sürtünmeli Temas Tanımlı Model Doğal Frekans Değerleri (Hz)	Yapışık Temas Tanımlı Model Doğal Frekans Değerleri (Hz)	% Fark
116,13	131,13	12,9
234,02	270,83	15,7
355,36	429,27	20,8
481,95	611,43	26,9
615,41	820,47	33,3



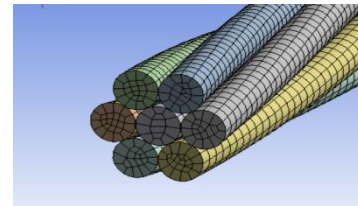
Şekil 8. Teller arasında temasın gösterimi

### 3.4 Çözüm Ağı Özellikleri (Mesh Properties)

Ansys Workbench 3 boyutlu katı modelleri Solid186 ve Solid187 elemanları ile çözüm ağı oluşturmaktadır. Solid186 elemanı küp şeklinde ikinci dereceden bir elemandır ve küpün hem köşelerinde hem de kenarların orta noktalarında olmak üzere 20 adet düğüm noktasına sahiptir. Solid186 elemanı ve üzerindeki düğüm noktaları şekil 8'de gösterilmiştir. Eğer program katı model geometrisinden dolayı Solid186 elemanı oluşturamazsa dörtyüzlü şeklindeki Solid187 elemanı ile sonlu elemanlar ağını oluşturmaktadır. Solid187 elemanı da ikinci dereceden bir elemandır ve dörtyüzlünün hem köşelerinde hem de kenarların orta noktalarında olmak üzere 10 adet düğüm noktası vardır. Ansys'deki her üç boyutlu elemanın düğüm noktalarının x,y ve z eksenlerinde olmak üzere 3 öteleme serbestlik derecesi vardır. Sonlu elemanlar ağı oluşturulan 1x7 3 mm tipindeki halat katı modelinin görünümü şekil 9'daki gibi olmaktadır.



Şekil 9. Solid186 elemanı



Şekil 10. Halat modelinin ağı yapısı görünümü

Her bir halat sonlu elemanlar modeli için ağ yapısında kullanılan eleman boyutu küçültülerek ağ yapısı yakınsama analizi yapılmıştır. Doğal frekans sonuçları ile eleman boyutunun değişimini gösteren analiz çizelge 4'de gösterilmiştir. Böylece elde edilen sonuçların ağ yapısından bağımsız olduğu gösterilmiştir.

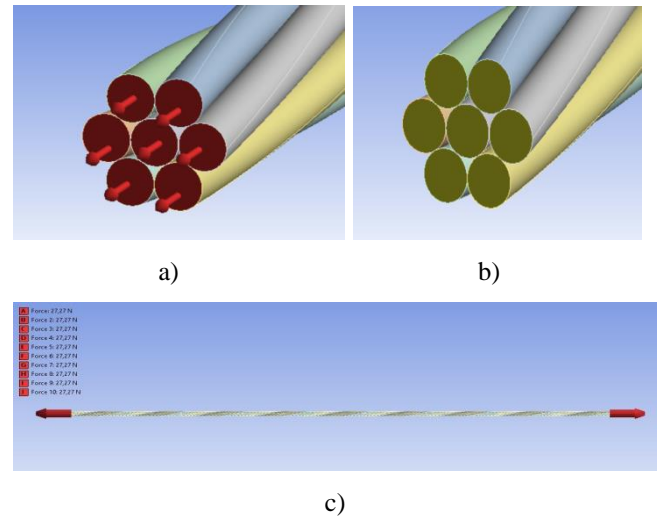
Çizelge 4. Çözüm ağı eleman büyüklüğüne göre doğal frekans değerleri yakınsama analizi

<b>1x7 3 mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x7 3mm 500 N (0,4 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x7 3mm 500 N (0,3 mm Eleman Boyutu)</b>
116,28	116,13	116,1
234,04	233,68	233,62
354,71	354	353,89
479,69	478,38	478,21
610,26	608,18	607,9
<b>1x7 5mm 500 N (0,7 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x7 5mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x7 5mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)</b>
65,512	65,501	65,499
138,91	138,9	138,83
226,65	226,66	226,5
333,31	333,33	332,96
461,69	461,58	461,06
<b>1x7 8mm 500 N (0,7 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x7 8mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x7 8mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)</b>
45,412	45,384	45,358
115,93	115,75	115,61
222,78	222,31	221,94
369,03	368,17	367,44
555,08	553,63	552,48
<b>1x19 3mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x19 3mm 500 N (0,4 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x19 3mm 500 N (0,3 mm Eleman Boyutu)</b>
111,44	111,48	111,35
229,76	229,67	229,04
361,37	360,59	358,98
511,51	509,32	506,19
683,78	680,14	674,27
<b>1x19 5mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x19 5mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x19 5mm 500 N (0,4 mm Eleman Boyutu)</b>
68,216	69,079	66,351
161,91	167,78	149,49
295,83	311,43	260,75
475,6	506,82	410
704,24	751,58	595,34
<b>1x19 8mm 500 N (0,7 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x19 8mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x19 8mm 500N (0,5 mm Eleman Boyutu)</b>
66,828	56,795	60,314
225,09	176,76	194,11
483,62	372,54	412,45
838,49	645,15	714,12
1169,1	994,73	1020,2

<b>1x37 5mm 500 N (0,6 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x37 5mm 500 N (0,5 mm Eleman Boyutu)</b>	<b>1x37 5mm 500 N (0,4 mm Eleman Boyutu)</b>
71,599	72,976	72,782
173,6	182,15	180,98
321,73	344,52	341,6
523,49	565,88	559,97
779,02	846,04	836,74

### 3.5. Sınır Şartları (Boundary Conditions)

Sınır şartlarının deney düzeneğinde kullanılan sınır şartı ile uygun olması için 500 mm uzunluğundaki halat katı modelinin her iki ucundaki halat kesitine dik (Z ekseninde) eşit büyüklükte her bir analiz için ayrı ayrı olmak üzere 1000 N, 800 N, 500 N ve 400 N büyüklüğünde kuvvet uygulanmıştır. Halat katı modelinin diğer eksenler (X ve Y) de hareket etmemesi için bu eksenlerdeki hareketi yer değiştirme (displacement) komutu ile sınırlandırılmıştır. Sonlu elemanlar modelinde kurulan bu sınır şartları şekil 10'da gösterilmiştir.



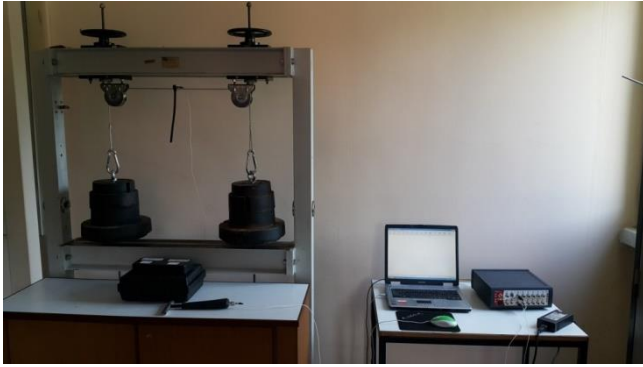
Şekil 11. Kuvvetlerin halatın uç noktalarından uygulanması (a-c) ve yer değiştirme sınır şartının uygulanması (b)

## 4. DENEYSEL DOĞAL FREKANS ÖLÇÜMÜ (EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF NATURAL FREQUENCY)

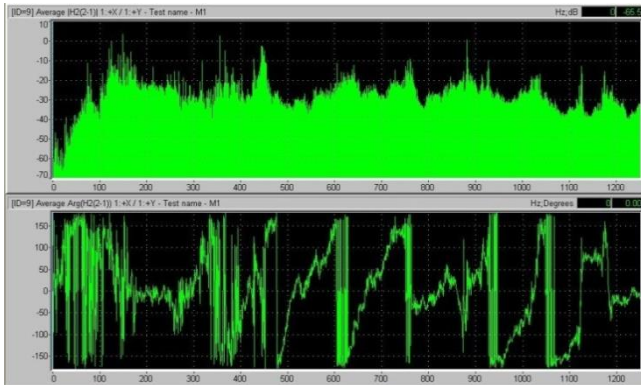
Deney standına doğal frekans ölçümü yapılacak halat numunesi ve iki uçtan gergi kuvvetini oluşturacak ağırlıklar makaralar yardımıyla asılmıştır. Uygulamada köprü halatlarında da kullanılan basit mesnet sınır şartı elde edilmeye çalışılmıştır. Halat üzerinden ölçümleri almak için



tek eksenli Dytran marka 3097A3T model ivmeölçer halatın orta noktasına yerleştirilmiştir. Darbe etkisi Brüel&Kjaer Type 8206-002 Modal Impact hammer ile elde edilmiştir. İvmeölçer yardımıyla alınan veriler Areva 01dB NetdB marka analizör yardımıyla bilgisayara aktarılmıştır. Deney standının genel görünümü şekil 11’de gösterilmiştir. Bilgisayar ortamına aktarılan veriler kullanılan analizörün kendi yazılımı olan dBFA Suite programı yardımıyla grafiksel olarak elde edilmiştir. Sönüm etkisinin ihmal edildiğinde sistem rezonans durumunda ise yer değiştirme ve kuvvet vektörleri arasındaki faz farkı  $180^\circ$  olmaktadır. Deneyde elde edilen grafiklerden halatın doğal frekansları bulunurken faz açısı değişimi de dikkate alınmıştır. Frekans cevabı ve faz eğrisi ilişkisi şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Deney standı genel görünümü

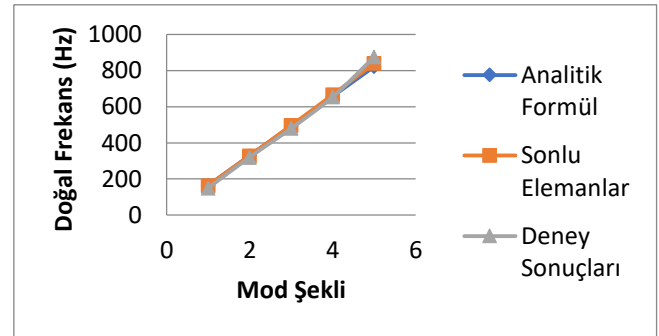


Şekil 13. Frekans cevabı ve faz eğrisi ilişkisi

## 5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND EVALUATION)

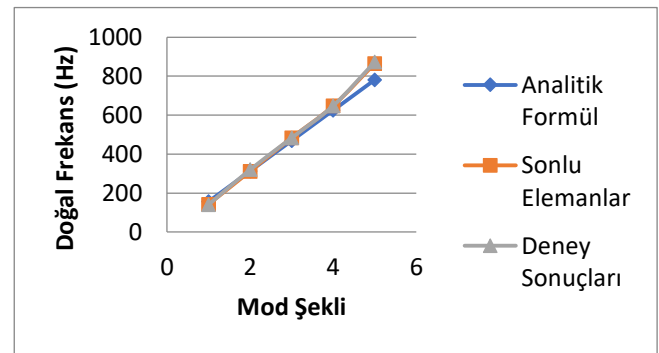
Yapılan bu çalışmada deneysel, sonlu elemanlar ve analitik formül sonuçlarının birbirleriyle uyumlu olduğu şekil 10 ve şekil 11’deki

grafiklerde görülmektedir. Analitik formül ile halatın doğal frekansı hesaplanırken doğal frekans değeri dalga karnı sayısına (antinod sayısı), halat uzunluğuna, ön gerilme kuvvetine ve halatın birim uzunluğunun kütlesine bağlıdır. Ancak bu hesaplamada halatın tipi dikkate alınmamaktadır. Yani aynı şartlarda incelenen birim uzunluğunun kütlesi aynı olan iki farklı halat tipinin doğal frekansı aynı çıkabilmektedir. Sonlu elemanlar analizinde sistem gerçekteki duruma göre modellenebildiği için bu fark ortaya çıkarılabilir. Şekil 12’deki grafikte görüldüğü üzere halatlar aynı çapta olsa bile halattaki tel sayısı arttıkça aynı şartlardaki halatın doğal frekans değerleri artmaktadır. Bunun tam tersi durum olduğunda yani farklı çaplardaki fakat aynı tel sayısına sahip halatlarda halatın çapı arttıkça doğal frekans değeri düşmektedir. Şekil 13’de de grafiksel olarak gösterilmiştir. Bu durum analitik formül ile yapılan hesaplamalarda da öngörülebilir. Çünkü halattaki tel sayısı arttıkça halat birim uzunluğunun kütlesi artmaktadır. Halat doğal frekans değeri de formüle bağlı olarak düşmektedir.



Şekil 10. 1000 N ön gerilme altında 1x7 3 mm halatın analitik formül, sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 11. 1000 N ön gerilme altında 1x19 3 mm halatın



analitik formül, sonlu elemanlar ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması

Test düzeneği kapasitesinden dolayı gerilme kuvveti, maksimum 1000 N, halat sisteminin

kararlılığı açısından minimum 400 N olarak alınmıştır. Tüm halat modelleri için yapılan analizler 400 N, 500 N, 800 N ve 1000 N olmak üzere 4 farklı ön gerilme durumu için yapılmıştır. Çizelge (6-12)'den de görülebileceği üzere uygulanan ön gerilme kuvveti arttıkça analizi yapılan halat tipi ve tel sayısı fark etmeksizin doğal frekans değerleri artmaktadır. Bu sonuç denklem 13'deki analitik formülden de direkt olarak görülebilir.

Bu çalışmada yapılan sonlu elemanlar analizinde halattaki teller arasındaki temasların ayrılmasız temas olduğu kabulü yapılmıştır. Ansys'de doğrusal olmayan temas türleri statik analiz bölümünde tanımlanabilmektedir. Modal analiz kısmında doğrusal olmayan temas türleri, temas yüzeyleri arasındaki mesafeye ve sürtünme katsayısına göre doğrusal temas türlerine (ayrılmasız temas veya yapışık temas) program tarafından dönüştürülmektedir. Statik analiz bölümünde sürtünme kuvveti tanımlanması sistemde oluşan gerilme değerini değiştirmektedir. Sürtünme kuvveti analizde sönüm etkisi oluşturmaktadır. Analitik formül sonuçları ile sonlu elemanlar analizi sonuçları karşılaştırıldığında halattaki tel sayısı ve halat tel çapı arttıkça iki sonuç arasındaki farklar da artmaktadır. Yani halatın analitik formül sonuçlarında olduğu gibi titreşim davranışı doğrusal olmamaktadır. Bu nedenle oluşturulacak sonlu elemanlar modelinin sistemin doğrusal olmayan davranışına uygun olması gerekmektedir. Çizelge (6-12)'de tüm sonuçlar için karşılaştırmalar gösterilmiştir.

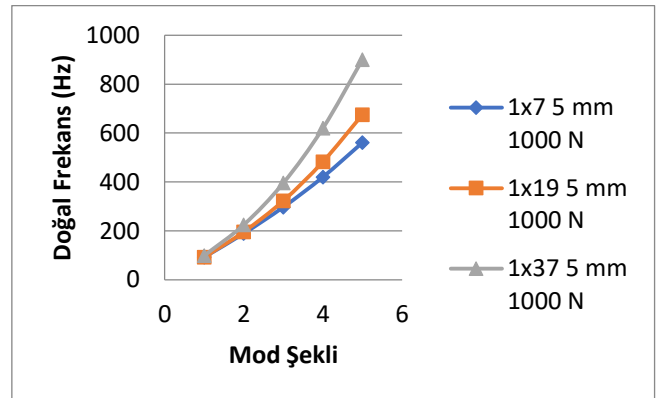
Sonlu elemanlar analizinde sistemin doğrusal olmayan temas seçeneği olan sürtünmeli temas seçeneği ile tanımlanması gerekmektedir. Bu durum sistemin doğru modellenmesini sağlamakla beraber çözümün gerçekleşmesi ve çözüm süresi analizin yapıldığı bilgisayarın hesaplama kapasitesine bağlıdır. Örneğin; 500 mm uzunluğundaki 1x7 3 mm tipindeki 500 N ön gerilme kuvveti uygulanan halat analizinde ayrılmasız temas içeren modelin çözüm süresi yaklaşık 10 saat olurken, sürtünmeli temas içeren modelin çözüm süresi yaklaşık 200 saat olmaktadır. Temas sayılarının daha fazla olduğu daha fazla telden oluşan halat analizlerinde sürtünmeli temas çözüm süresini daha da fazla arttıracaktır.

Sürtünmeli temas içeren model ile ayrılmasız temas içeren modelin karşılaştırılması yapılırken 500 mm uzunluğundaki katı model kullanılmıştır. İki analiz sonuçları arasındaki yüzdesel fark

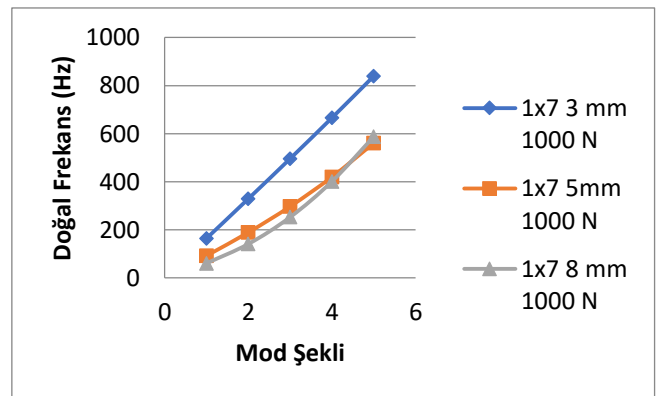
çizelge 2'de gösterilmiştir. Ancak 200 mm uzunluğundaki iki halat katı modelinin karşılaştırılması yapıldığında sürtünmeli temas içeren model ile ayrılmasız temas içeren modelin sonuçları arasındaki fark artmaktadır. Bu durum çizelge 5'de gösterilmiştir. Halat katı modelinin uzunluğu arttıkça doğrusal ve doğrusal olmayan temas içeren modellerin sonuçları arasındaki farkın azalması katı model boyutunun görece daha uzun olduğu modellerde çözüm süresini kısaltmak amacıyla sürtünmeli temas yerine ayrılmasız temas kullanılabilmesini sağlamaktadır.

Çizelge 5. Farklı uzunluklara sahip modellerin temas tiplerine göre karşılaştırılması

Mod Şekli	200 mm Uzunluğundaki Katı Model için Sürtünmeli ve Ayrılmasız Temas Sonuçları Farkı (%)	500 mm Uzunluğundaki Katı Model için Sürtünmeli ve Ayrılmasız Temas Sonuçları Farkı (%)
1	3,8	0,13
2	12,1	0,15
3	20,4	0,20
4	26,6	0,27
5	30,5	0,34



Şekil 12. Aynı çap ölçüsündeki farklı sayıda tel sarımı içeren halatların sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması



Şekil 13. Farklı çap ölçüsündeki aynı sayıda tel sarımı içeren halatların sonlu elemanlar analizi karşılaştırılması

Çizelge 6. 1x7 3 mm halat tipi için analitik analiz, sonlu elemanlar analizi ve deneyde elde edilen doğal frekans değerleri karşılaştırılması

1x7 3mm							
1000 N				800 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	164	164	150	1	147	147	161
2	329	329	320	2	294	295	300
3	493	496	480	3	441	445	442
4	658	666	654	4	588	598	600
5	822	840	875	5	735	756	735
500 N				400 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	116	116	107	1	104	104	107
2	232	234	231	2	208	209	210
3	349	354	352	3	312	318	310
4	465	478	462	4	416	431	421
5	581	608	607	5	520	550	528

Çizelge 7. 1x7 5 mm halat tipi için analitik analiz, sonlu elemanlar analizi ve deneyde elde edilen doğal frekans değerleri karşılaştırılması

1x7 5 mm							
1000 N				800 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	91	92	98	1	81	82	84
2	182	189	186	2	163	171	184
3	273	297	301	3	244	271	267
4	364	420	430	4	325	388	388
5	455	561	566	5	407	524	517
500 N				400 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	64	65,499	66	1	57	59	45
2	129	139	128	2	115	127	135
3	193	227	223	3	172	210	211
4	257	333	337	4	230	313	321
5	321	461	451	5	287	439	429

Çizelge 8 1x7 8 mm halat tipi için analitik analiz, sonlu elemanlar analizi ve deneyde elde edilen doğal frekans değerleri karşılaştırılması

1x7 8 mm							
1000 N				1x7 8 mm 800 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	57	61	-	1	51	55	-
2	114	141	-	2	102	131	-
3	171	253	-	3	153	241	-
4	228	401	-	4	204	388	-
5	285	588	-	5	255	574	-
1x7 8 mm 500 N				1x7 8 mm 400 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	40	45	-	1	40	42	-
2	81	116	-	2	81	110	-
3	121	222	-	3	121	215	-
4	161	367	-	4	161	360	-
5	202	552	-	5	202	545	-

Çizelge 9. 1x19 3 mm halat tipi için analitik analiz, sonlu elemanlar analizi ve deneyde elde edilen doğal frekans değerleri karşılaştırılması

1x19 3 mm							
1000 N				800 N			

Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	156	142	140	1	140	140	139
2	312	312	320	2	279	286	290
3	469	483	483	3	419	440	457
4	625	648	648	4	559	533	518
5	781	864	872	5	698	611	609
500 N				400 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	110	111	100	1	99	100	107
2	221	229	225	2	198	207	217
3	331	359	348	3	296	327	329
4	442	506	498	4	395	466	474
5	552	674	676	5	494	628	618

Çizelge 10. 1x19 5 mm halat tipi için analitik analiz, sonlu elemanlar analizi ve deneyde elde edilen doğal frekans değerleri karşılaştırılması

1x19 5 mm							
1000 N				800 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	89	92	93	1	80	83	92
2	179	196	197	2	160	179	176
3	268	323	322	3	240	300	298
4	358	483	483	4	320	455	455
5	447	675	691	5	400	645	642
500 N				400 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	63	66	56	1	57	60	54
2	126	149	144	2	113	138	135
3	190	261	257	3	170	246	254
4	253	410	408	4	226	394	401
5	316	595	597	5	283	578	571

Çizelge 11. 1x19 8 mm halat tipi için analitik analiz, sonlu elemanlar analizi ve deneyde elde edilen doğal frekans değerleri karşılaştırılması



1x19 8 mm							
1000 N				800 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	58	70	-	1	52	65	-
2	116	195	-	2	104	188	-
3	174	393	-	3	156	385	-
4	232	666	-	4	208	658	-
5	291	1016	-	5	260	1008	-
500 N				400 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	41	60	-	1	37	54	-
2	82	194	-	2	74	173	-
3	123	412	-	3	110	368	-
4	164	714	-	4	147	641	-
5	205	1020	-	5	184	990	-

Çizelge 12. 1x37 5 mm halat tipi için analitik analiz, sonlu elemanlar analizi ve deneyde elde edilen doğal frekans değerleri karşılaştırılması

1x37 5 mm							
1000 N				800 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	93	98	97	1	83	89	90
2	186	224	225	2	166	208	202
3	279	396	400	3	249	374	376
4	371	620	621	4	332	596	593
5	464	901	910	5	415	875	892
500 N				400 N			
Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney	Mod Şekli	Analitik	Sonlu Elemanlar	Deney
1	66	73	64	1	59	67	62
2	131	181	185	2	117	171	185
3	197	342	335	3	176	330	335
4	263	560	566	4	235	548	545
5	328	837	839	5	294	824	820

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kösemen, Ö., Asansör Taşıyıcı Halatlarının Statik Yük Altında Deneysel Gerilme Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2008.
- [2] Jiang W., G., Yao M., S., Walton J., M., A Concise Finite Element Model For Simple Straight Wire Rope Strand, International Journal of Mechanical Sciences, 41:143-161, 1999.
- [3] Ghoreishi S.R., Messenger T., Cartraud P., Davies P., Validity and Limitations of Linear Analytical Models For Steel Wire Strands Under Axial Loading Using a 3D FE Model, International Journal of Mechanical Sciences, 49:1251-1261, 2007.
- [4] Spak K., Agnes G., Inman D., Cable Modelling and Internal Damping Developments, Applied Mechanics Reviews, 65 10801:1-18, (2013).
- [5] Stanova E., Federko G., Fabian M., Kmet S., Computer Modelling of Wire Stands and Ropes Part 1: Theory and Computer Implementation, Advances in Engineering Software 42:305-315, 2011.
- [6] Stanova E., Federko G., Fabian M., Kmet S., Computer Modelling of Wire Stands and Ropes Part 2: Finite Element Based Applications, Advances in Engineering Software 42:322-331, 2011.
- [7] Wu J., The Finite Element Modelling of Spiral Ropes, International Journal of Coal Science Technology 1(3): 346-353, 2014.
- [8] Yu Y., Chen Z., Liu H., Wang X., Finite Element Study of Behavior and Interface Force Conditions of Seven Wire Strand Under Axial and Lateral Loading, Construction and Building Materials, 66:10-18, 2014.
- [9] Feyrer K., Wire Ropes Tension, Endurance, Reliability, Second Edition, Springer, Berlin, 2015.
- [10] Zweifel O., Zugkraftmessung in Drahtseilen mit Transversalwellen, Schweizerische Bauzeitung, 79:347-358, 1961.
- [11] Lee H., Finite Element Simulations with Ansys Workbench 15, First Edition, SDC Publications, Kansas, 2014.
- [12] Ansys Release 14.0 Mechanical User's Guide, Ansys Inc., 2011.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE		
	e-ISSN: 2147-835X <b>Dergi sayfası:</b> <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 27.02.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 24.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.295273	

## Kirlenmiş topraklardaki *p,p'*-DDE'nin kabak bitki özsuyu ile ilişkili biriktirme mekanizması

Mehmet İşleyen<sup>1\*</sup>, Beytullah Eren<sup>2</sup>, Ahmet Aygün<sup>3</sup>

### ÖZ

Bu araştırmada yıllanmış *p,p'*-DDE kirlenmiş topraklarda yetiştirilen Raven ve Zephyr kabak türlerinde, *p,p'*-DDE'nin topraktan bitki yapısına geçişinde bitki özsuyunun etkisini araştırmak için deneyler yürütülmüştür. Raven bitki özsuysundaki 0,21 µg/L ortalama *p,p'*-DDE konsantrasyonunun Zephyr bitki özsuysundaki değerle karşılaştırıldığında 10 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Buna paralel olarak, Raven ve Zephyr bitki gövdelerindeki *p,p'*-DDE konsantrasyonu sırasıyla 1561 µg/Kg ve 40 µg/Kg olarak belirlenmiştir. Bitki özsuysunda tesbit edilen Beyazımsı Kolloidal Yapıda Maddeler (BKYM), özsuysundaki *p,p'*-DDE miktarındaki artışa, bunun sonucunda da bitki gövdesinde daha fazla birikime sebep olacağı konusunda şüphe uyandırmıştır. Bu araştırma *p,p'*-DDE'nin bitki özsuysundaki BKYM ile taşındığını gösteren ilk deneysel çalışmadır.

**Anahtar Kelimeler:** DDT, Bitki Özsuysu, Raven, Zephyr

### Xylem related *p,p'*-DDE uptake mechanism by cucurbita pepo spp pepo from contaminated soil

### ABSTRACT

Experiments were conducted to assess the effects of xylem sap *p,p'*-DDE concentrations of Raven and Zephyr plants grown in contaminated soil on the phytoextraction of *p,p'*-DDE from soil by plant systems. An average of 0.21 µg/L *p,p'*-DDE concentration in Raven was almost 10 times more than that of xylem sap value obtained from Zephyr. Colloidal Whitish Material (CWM) incidentally discovered in xylem may increase *p,p'*-DDE concentrations in xylem saps, showing CWM related uptake mechanism in the first time with this research that more DDE accumulations in shoots of Raven and Zephyr plants which were 1561 µg/Kg and 40 µg/Kg, respectively.

**Keywords:** DDT, Xylem Sap, Raven, Zephyr

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye- [mehmet.isleyen@btu.edu.tr](mailto:mehmet.isleyen@btu.edu.tr)

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye - [beren@sakarya.edu.tr](mailto:beren@sakarya.edu.tr)

<sup>3</sup>Bursa Teknik Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye- [ahmet.aygun@btu.edu.tr](mailto:ahmet.aygun@btu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kalıcı Organik Kirleticiler (KOK), uzun süre doğada kalabilen, biyolojik parçalanabilirlikleri düşük, bitkilerin ve hayvanların yapısında eser miktarda da olsa birikebilen ve kanserojen özelliğe sahip kirleticilerdir [1-8]. Bu tür kirleticiler atmosferik taşanımlar sonucu, tarımsal faaliyetlerin hiç yapılmadığı kuzey kutbu dahil kirletici maddelerin direkt uygulanmadığı alanlarda bile ölçülebilmektedir [9-11]. Toprakta zamanla biyotik veya abiyotik reaksiyonlar sonucunda DDD ve DDE gibi metabolik ürünlere dönüşebilen DDT literatürde tanımlanan 21 adet KOK kirleticilerinden biridir. KOK'ların çevresel etkilerinin kontrol altına alınması, yönetilmesi, doğadaki akıbetlerinin belirlenmesi ve çevresel ortamlardaki miktarlarının azaltılması tarım alanlarının sürdürülebilir kullanımının temin edilmesi için çok önemlidir [12]. 1984'te ülkemizde de kullanımı yasaklanan DDT ile dönüşümü sonucu oluşan metabolik kalıntılarına, hava, su, toprak, anne sütü, bitki ve dokusal ürünlerde rastlandığı bilimsel çalışmalar ile ortaya konulmuştur [13-20]. Tüm bu risk faktörleri dikkate alınarak yoğun tarımsal faaliyetlerin sürdürüldüğü ülkemiz bu kirleticilerin etkilerinin en aza indirilmesi için Stockholm sözleşmesine taraf olmuştur [21].

Bitki zararlılarına karşı zirai mücadele kullanılan KOK'ların yasaklanmasından önce ve yasaklanmasından sonra da bilinçsiz tarım uygulamalarında tercih edilmesi veya atmosferik taşınım sonucu toprakta birikimi söz konusudur [22-24]. Zamanla toprağın organik kısmına bağlanan KOK'lar, oluşan yapının kompleks oluşu, göreceli olarak biyolojik parçalanabilirliğinin az oluşu toprağın faydalı kullanımını sınırlamaktadır [25]. Fitoremediyasyon yöntemi haricinde KOK'lar ile kirlenmiş toprağın yeniden amaca uygun olarak kullanılabilmesi için tercih edilebilecek arıtım yöntemleri, ileri teknolojiler gerektirmesi ve yüksek maliyetli oluşu nedeniyle uygulanabilir olmaktan uzaktır [26-29].

Fitoremediyasyon bitkiler yardımıyla organik veya inorganik kirleticilerin toprak, su veya hava ortamından uzaklaştırılması olarak bilinir. Kirlenmiş toprağa ekilen bitkiler, bu kirleticileri köklerinde biriktirerek, bitkinin üst kısımlarına doğru taşıyabilmektedirler. Cucurbita türlerinin Dioxin ve Furan gibi KOK'ları bitki yapısında

biriktirdiği Hulster ve ark. Tarafından ilk defa rapor edilmiştir [30]. Daha sonra yapılan çalışmalarda ise Cucurbita türlerinin topraktaki yıllanmış p,p'-DDE, poliklorlu bifeniller (PCBs), ve chlordanone biriktirme özelliği olduğu, squash türü kabak, kavun, karpuzun bu özelliğinin olmadığı vurgulanmıştır [31-33]. Diğer bitkilerle kıyaslandığında topraktaki yıllanmış DDE ve diğer KOK'ların Cucurbita pepo tarafından en fazla biriktirildiği ortaya çıkmıştır. Bitki yapısında biriken kirletici miktarı bitkinin fizyolojik ve kirleticinin fiziksel-kimyasal özelliklerine bağlı olsa da, p,p'-DDE gibi KOK'ların Cucurbita pepo yapısında birikme mekanizması henüz aydınlatılamamıştır [31,34-40]. Bu mekanizmanın aydınlatılması için yapılan sera ve saha deneylerinde, bitki yapısında biriken DDE ve Chlordane konsantrasyonlarının bitki kökünden başlayarak, gövde, yaprak ve meyvesine doğru azaldığı görülmüştür [40].

Yapılan çalışmalarda, topraktaki yıllanmış DDE ve diğer KOK'ların Cucurbita pepo tarafından en fazla biriktirildiği bu bitki türünün bu tür kirleticiler en fazla biriktirebilen bir alıcı olduğu vurgulanmıştır. Yapılan çalışmalarda Cucurbita pepo biriken DDE ve Chlordane miktarının bitki kökünde en fazla ve bitki gövde, yaprak ve meyvesine doğru azaldığı vurgulanmıştır [38, 41-42]. Daha detaylı çalışmada kabak köküne aşılana karpuz bitkilerindeki birikim, aşısız karpuzlarla karşılaştırıldığında, aşılı karpuzlardaki birikimin aşısız karpuzlardan çok daha fazla olduğu gözlenmiştir [43]. Aynı çalışmada aşılı karpuzların bitki öz suyundaki p,p'-DDE birikimi aşısız kabaklarda aşılı karpuzlardan 2 kat daha fazla olduğu, bu değerlerin aşısız karpuzlardan yaklaşık 140 kat daha fazla olması mekanizmanın hem kök bölgesi hem de bitki öz suyunda saklı olduğunun altını çizmiştir [44]. Bu araştırmaya ile ilk defa bitki öz suyundaki Cucurbita pepo nun DDE alınışına etki eden yapının fiziksel ispatı araştırılmıştır. Bu araştırmada alıcı ve alıcı olmayan 2 kabak türü DDE ile kirlenmiş toprakta sera şartlarında yetiştirilerek, bu bitkilerin öz suyundaki DDE miktarları ve bitki öz suyunun DDE bağlaması üzerine etkisi incelenmiştir.

## 2. MATERYAL METOT (MATERIALS AND METHODS)

### 2.1. Bitkiler

Literatürdeki çalışmalar göz önüne alınarak, topraktaki yıllanmış p,p'-DDE'yi etkin biriktirme potansiyeli olan Cucurbita pepo ssp pepo ("Raven") ve biriktirme potansiyeli çok daha az olan Cucurbita pepo ssp ovifera ("Zephyr") kabak [41,45] tohumları "Johnny's Selected Seeds" firmasından satın alınmıştır. Viyollerde çimlendirilen kabak tohumları (Şekil 1), içerisinde temiz veya yıllanmış p,p'-DDE içeren topraklarla doldurulan saksılara transfer edilmiş ve kontrol ve kirlenmiş topraklardaki her bir bitki eşit miktarda sulanarak, sera şartlarında yetiştirilmiştir.



Şekil 1. Tohumların çimlendirilmesi ve Saksıları Transfer edilen Bitkiler (Seed Germination and Plant transferred into Pots)

### 2.2. Kirlenmiş Toprak (Contaminated Soil)

Bu çalışmada kullanılan topraklar, Sakarya İli Karasu İlçesinde yer alan p,p'-DDT ve metabolitleri ile kirlenmiş [16] özel bir alandan alınmıştır. Kirlenmiş alanın 0-30 cm derinliğinden numuneler 2 mm'lik elekten geçirilerek, ot taş gibi maddeler uzaklaştırılmıştır. Her bir saksıya elenmiş p,p'-DDT ile kirlenmiş ve kirlenmemiş topraklardan 5 kg ilave edilmiş, hazırlanan bu saksılarda 5 tekrarlı olmak üzere Cucurbita pepo ssp pepo ("Raven") ve Cucurbita pepo ssp ovifera ("Zephyr") kabak türleri olmak üzere yetiştirilmiştir. Bitkiler 35 günlük yetiştirme periyodu sonunda hasat edilmiş ve numuneler uygun şartlarda saklanmıştır. (Şekil 2)

### 2.3. Bitki Öz Suyu Toplanması (Xylem Saps Collection)

Daha önce yayınlanan makalelerdeki bitki öz suyu toplama metodu modifiye edilerek bu çalışmada kullanılmıştır [43]. Bu metot kısaca şöyle özetlenebilir: 35 günlük yetiştirme periyodu sonunda, bitki bulduran saksılara doygunluk değerine ulaşmaya kadar su eklendi. Daha sonra saksılardaki fazla suyun akması için 4 saat beklendi. Bitki kökü saksı toprağından yaklaşık 4 cm yukarıdan kesilerek, bitki öz suyunun yerçekimi ile kolayca akabilmesi için saksılar (Şekil 3)'te gösterildiği gibi yaklaşık 30 derece eğim olacak şekilde saksı diplerinden kaldırılmıştır. Bitki gövdesinin kesilen kısmı temizlendikten sonra 40 mL temiz cam şişeler, bitki öz suyunun içine akacak şekilde yerleştirilmiş ve şişe ağzı para-film ile kapatılarak, dışarıdan safsızlıkların şişeye girmesi engellenmiştir. Yaklaşık 8 saatlik bitki öz suyu toplama periyodunun sonunda toplanan hacim ölçülmüş, toplanan bitki öz suları analiz edilene kadar derin dondurucuda saklanmıştır.



Şekil 2. DDT ile Kirlenmiş Toprakların İçeren Saksılarda Yetişen Zephyr ve Raven Bitkileri (Zephyr and Raven Plants Growing in Pots Packed with DDT Contaminated Soil)



Şekil 3. Bitkilerden Bitki Özsuğu Toplanması (Xylem Sap Collection from the Plants)

#### 2.4. Toprakta ve bitki öz suyundaki DDE'nin ölçülmesi (DDE measurement in Soil and Xylem Saps)

Daha önce yayınlanmış olan metod modifiye edilerek bu çalışmada kullanılmıştır [16, 43-44]. Her bir saksıdan alınan toprak numuneleri oda şartlarında kurutulmuş ve analiz edilene kadar amber cam şişelerde kapalı olarak bekletilmiştir. Hacmi 40 mL olan şişelere 3 gram toprak numunesi tartılarak üzerine 506 nano-gram iç standart eklendikten sonra, 15 mL hekzan ilave edilip kapakları kapatılarak etüvde 70 °C de 5 saat

bekletilmiş. Oda sıcaklığında soğutulan ekstraktan 2 mL alınıp, mikro-cam pipet fitrelerden (0,20 µm boşluk çaplı) süzülerek GC-şişelerine konup, teflon kapağı sıkıca kapatıldıktan sonra analiz edilene kadar derin dondurucuda saklanmıştır.

Deneylerde elde edilebilen bitki öz suyunun hacminin az olmasından (< 3 mL) dolayı, bitki öz suyundaki DDE ölçülmesi için Katı Faz Mikro Ekstraksiyon (KFME) yönteminin geliştirilip, ölçülecek olan kirleticiler için optimize edilmiştir.



Geliştirilen KFME yöntemi şöyle özetlenebilir. Tekil p,p'-DDT standartları için: standart hacmi + saf su hacminin 990 µL'ye ve 2 mL GC şişesine hacim 990 µL bitki öz suyu numunesi veya bitki öz suyu + saf su hacminin 990 µL olacak şekilde eklendikten sonra, bütün numunelere konsantrasyonu 7,06 ng/µL olan iç standarttan 10 µL ilave edilerek toplam hacim 1000 µL'ye tamamlanmıştır. GC şişesi teflon kapaklı kapaklarla sıkıca kaplandı. Sıcaklığı 45 °C olan otomatik kontrollü su banyosuna, şişenin yarısı su içerisinde olacak şekilde konuldu. Kalınlığı 65 µm ve uzunluğu 1 cm olan PDMS-DVB fiberi numune içerisinde daldırıldı ve 30 dakika boyunca 45°C deki su banyosu ile temas eden şişedeki kirleticinin bu özel fibere bağlanması sağlandı. Daha sonra bu fiber GC' nin enjeksiyon bölümünde 5 dakika tutularak, bağlanan kirleticiler sıcaklığın etkisiyle desorblandı. Toprak ve bitki öz suyu numunelerdeki p,p'-DDE miktarını ölçmek için Agilent marka 6890N GC'de µ-ECD detektörü kullanan metot:

Enjektör 280 °C ve detektör 300 °C sıcaklıklarında tutuldu. Fırın sıcaklığı 80 °C 2 dakika tutulduktan sonra 25 °C/dakika ile 190 °C'ye, 5 °C/dakika ile 280 °C'ye ve 25 °C/dakika ile 300 °C'ye çıkarılıp bu sıcaklıkta 2 dakika tutuldu. Bu analizlerde esnasında HP-5MS kolondan (30 m x 0.25 mm x 0.25 µm ) dakikada 60 mL taşıyıcı gaz olarak yüksek saflıkta azot geçirildi. Bu metod için gerekli analiz süresi 27,2 dakikadır. Toprak numunelerdeki p,p'-DDT, p,p'-DDD ve p,p'-DDE miktarları 7 noktalı içerisinde iç standart bulunan hekzan ortamındaki tekil kalibrasyon standartları (10 ppb - 1000 ppb) kullanılarak hesaplanmıştır. Bitki özsuğundaki p,p'-DDT, p,p'-DDD ve p,p'-DDE miktarları konsantrasyonları (0,01 ppb -5 ppb) arasında olan metanol fazındaki tekil standartlar kullanılarak ölçülmüştür.

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSION)

#### 3.1. Topraktaki DDE Konsantrasyonu (DDE concentration in the soil)

Raven ve Zephyr bitkilerinin yetiştirildiği 5 tekrarlı saksılardan alınan toprak numunelerindeki ortalama p,p'-DDT, p,p'-DDD, p,p'-DDE ve toplam DDTs (DDTs = p,p'-DDT + p,p'-DDD + p,p'-DDE) değerleri µg/Kg olarak ve bu ölçümlerin standard sapmaları (Tablo 1)'de verilmiştir. Raven türü kabakların yetiştirildiği saksılarındaki ortalama p,p'-DDE konsantrasyonu 120,58 µg/Kg ve Toplam DDTs miktarı 646,16 µg/Kg olarak ölçüldü. Bu kirleticiler Zephyr bitkilerinin yetiştirildiği saksı topraklarında ortalama 117,61 µg/Kg DDE ve 635,15 µg/Kg DDT olarak ölçülmüştür. Deneyde kullanılan kirlenmiş toprağın saksılara doldurulmadan çok iyi bir şekilde karıştırılması sonucu, saksılardaki ortalama kirleticiler miktarları iki kabak türü için birbirine yakın değerler olarak ölçülüp, bu değerler istatistiksel birbirlerinden farklı değildir. Her iki kabak türünün yetiştirildiği saksılarda kullanılan topraklardaki kirleticiler konsantrasyonlarının birbirine yakın olması, bitkilerdeki birikime toprak konsantrasyonundan kaynaklanacak farklılığı etkisini ortadan kaldırarak, sadece bitkisel farkın önemini ortaya çıkaracaktır. Daha önce yapılan çalışmada bu kirlenmiş alanın çeşitli yer ve derinliklerinden alınan toprak numunelerindeki p,p'-DDT konsantrasyonları 52-1935 ng/g, toplam DDTs değerleri ise 126-3557 ng/g verilmiş olup, tarımsal amaçlı kullanıma bağlı olarak değişik oranlarda kirlendiği rapor edilmiştir [16]. Aynı çalışmada bu alanın 0- 60 cm tarımsal amaçlı kullanım sıklığına bağlı olarak aşırı derecede kirlendiği ve p,p'-DDT, p,p'-DDD, p,p'-DDE ye rastlandığı vurgulanmıştır.

Tablo 1. Deneylerde Kullanılan Saksı Topraklarının DDT, DDD ve DDE Miktarı (Soil DDT, DDD, and DDE concentrations used in Pot Experiment)

Saksılar		Topraktaki Kirleticiler			Toplam DDTs (µg/Kg)
		p,p'-DDE (µg/Kg)	p,p'-DDD (µg/Kg)	p,p'-DDT (µg/Kg)	
Raven Saksıları	Ortalama	120,58	55,37	470,21	646,16
	Standard Sapma	2,11	4,70	37,15	43,31
Zephyr Saksıları	Ortalama	117,61	51,27	466,28	635,15
	Standard Sapma	2,23	1,42	22,63	25,62

#### 3.2. Bitki Öz Suyu DDE Konsantrasyonu (DDE concentrations in Xylem Sap of the Plants)

Bitki özsuğundaki ortalama kirleticiler miktarları Raven ve Zephyr kabak bitkileri için (Tablo 2)

özetlenmiştir. Kontrol saksılarında yetiştirilen bitkilerin öz suğunda hedeflenen kirleticiler cihazın ölçüm sınırlarının altında bulunmuştur. Raven bitki özsuğundaki ortalama p,p'-DDE, p,p'-DDD ve p,p'-DDT konsantrasyonları sırasıyla 0,209 µg/L, 0,194

$\mu\text{g/L}$  ve  $0,375 \mu\text{g/L}$  olarak ölçülmüş olup bu değerler Zephyr bitki öz suyunda ölçülen ortalama değerlerin yaklaşık 10 kat daha büyüktür. Daha önce sera ve gerçek alanda yapılan çalışmalarda Raven bitki gövdesinde biriken p,p'-DDE ve Klordan'ın, Zephyr bitki gövdesinde birikimden

çok daha fazla olduğu ve Raven bitkisinin bu tür kirleticiler için Zephyr'den çok daha iyi bir alıcı olduğu literatürde belirtilmiştir [40, 43-44]. Bizim çalışmamızda bitki öz suyunda ölçülen kirleticiler miktarları daha önce yapılan çalışmaları destekler niteliktedir.

Tablo 2. Bitki Özsuysundaki DDT, DDD ve DDE Miktarları (DDT, DDD, and DDE concentrations in Xylem Sap of the Plants)

Bitki		Bitki Özsuysundaki			Toplam DDTs ( $\mu\text{g/L}$ )
		p,p'-DDE ( $\mu\text{g/L}$ )	p,p'-DDD ( $\mu\text{g/L}$ )	p,p'-DDT ( $\mu\text{g/L}$ )	
Raven Saksıları	Ortalama	0,209	0,194	0,375	0,778
	Standard Sapma	0,044	0,066	0,090	0,199
Zephyr Saksıları	Ortalama	0,022	0,021	0,031	0,058
	Standard Sapma	0,004	0,009	0,004	0,022

Bu çalışmada geliştirilen KFME metodu bitki öz suyundaki p,p'-DDE türü kirleticilerin tespit limiti  $0,01 \text{ ppb}$  olarak belirlenmiştir. Her bir bitki türü için, 5 tekrarlı yapılan deneyler sonucunda elden bitki öz suyundaki kirleticiler konsantrasyonları ölçülerek bunların ortalaması verilmiştir. Ölçülen DDT ve metaboliklerinin konsantrasyonları Raven türü kabaklarda Zephyr'den çok fazla olması, bitki öz suyunu içeren bir taşıma mekanizması üzerindeki şüpheleri güçlendirmektedir. Burada öne sürülebilecek en önemli sorulardan birisi "Bitki öz suyunda p,p'-DDE'yi bağlayan yapının ne olduğu ve kök sisteminden bitki öz suyuna nasıl geçtiği konusunun aydınlatılması konusunda" olacaktır.

Zephyr bitkisiyle kıyaslandığında, Raven bitki öz suyunda ölçülen yüksek kirleticiler konsantrasyonu, bitki gövdesindeki yüksek konsantrasyonun en önemli faktörü olup olmadığı konusunun aydınlatılması için bilimsel çalışmaların yapılması gerekmektedir. Raven kabaklarında, p,p'-DDE gibi kalıcı kirleticileri biriktirmesine sebep olan mekanizma bitki öz suyunda gizli olduğu düşünülmektedir. Bu araştırma bu konunun aydınlanması için yapılan deneysel çalışmalarının sonuçlarının sunulduğu ilk bilimsel çalışmadır.

### 3.2. Bitki Gövdesindeki DDE Konsantrasyonu (DDE concentrations in shoots of plants)

Raven ve Zephyr kabak bitkilerinin gövdesindeki p,p'-DDE ve toplam DDT konsantrasyonları her bitki türü için 5 tekrarlı deneysel çalışmanın ortalaması ve standard sapmaları (Şekil 4) de verilmiştir.

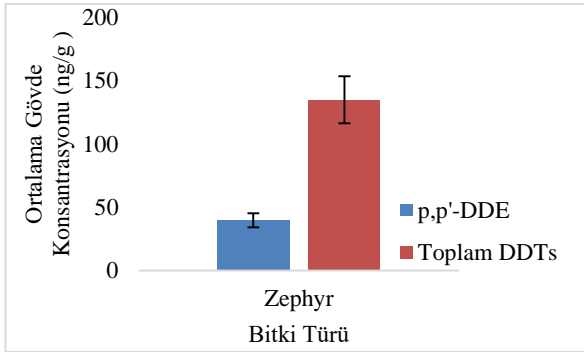
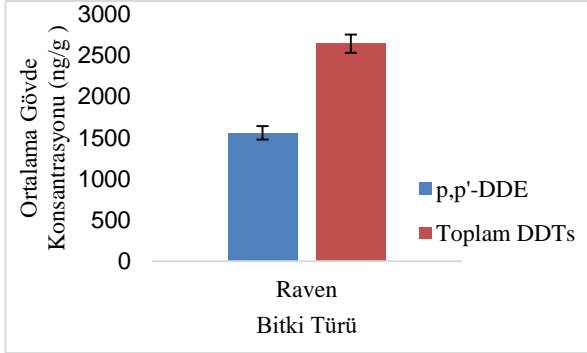
Raven bitki gövdesindeki ortalama p,p'-DDE konsantrasyonu  $1560,87 \text{ ng/g}$  (kuru ağırlık) olarak ölçülürken bitki gövdesindeki ortalama DDTs (p,p'-DDE, p,p'-DDD ve p,p'-DDT) değeri  $2645,20 \text{ ng/g}$

kuru ağırlık olarak hesaplanmıştır. Zephyr bitki gövdesindeki ortalama konsantrasyonlar p,p'-DDE ve toplam DDT değerleri sırasıyla  $39,74 \text{ ng/g}$  ve  $95,08 \text{ ng/g}$  olarak belirlenmiştir. Bitki öz suyundakine benzer şekilde Raven türü kabak gövdesindeki DDTs birikimi, Zephyr türü kabaklardan fazla olarak gözlenmiştir. Raven türü kabaklardaki p,p'-DDE birikimi, Zephyr bitkisiyle kıyaslandığında yaklaşık 40 kat daha fazla olduğu ve toplam DDTs için bu değer 20 olarak hesaplanmıştır. Bu veriler bitki öz suyu temelli taşın mekanizmasının öne çıkarsa da, kök sisteminden bitki öz suyuna nasıl geçtiği veya bitki öz suyuna nasıl bağlandığı konusunda detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır.

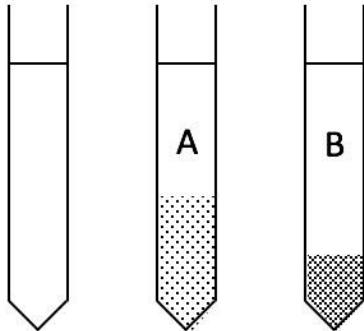
Bu kapsamda yapılan bu çalışmada, DDT ile kirlenmiş saksılarda ve kontrol saksılarında (DDT içermeyen toprak) yetişen bitkilerden toplanan bitki öz suları kullanılarak daha detaylı incelemeler yapılmıştır. Toplanan bitki öz suyu bazı proseslerden geçirildikten sonra, bitki öz suyu içerisinde proses uygulanıncaya kadar mevcut olmayan beyazımsı koloidal yapıda maddeler (BKYM) oluşmaya başladı. BKYM oluşum süreci için patent başvurusu yapılacağı için burada açıklanmayacaktır. Toplanan bitki öz suyunun hacminin az olmasından dolayı BKYM'nin bitki öz suyundan kısmi olarak ayırarak yöntem geliştirilmiş olup,  $100\%$  ayırarak yöntem bu aşamada geliştirilememiştir. Yapılan ilk deneyde, proses sonucunda oluşan BKYM sıvı fazdan kısmi olarak ayrılıp, oluşan BKYM güçlü asitlerde ve Hekzan gibi çözücülerde çözülmediği için inorganik ve organik içeriği hakkında daha detaylı bilgi elde edilememiştir.

Bu yapının p,p'-DDE gibi kirleticileri yapısında tutup, tutmadığı konusunda ön çalışmalar için, içerisinde BKYM oluşturulan Raven bitki öz suyu;

2000 rpm ve 1000 rpm de 1 dakika santrifüj edilerek koloidal faz içeren BKYM (Şekil 5) te gösterildiği gibi A ve B tüplerindeki gibi kısmi olarak ayrılmıştır. Bu santrifüjleme işlemi esnasında 2000 rpm'den büyük hızlarda proses sonucunda oluşan BKYM'nin parçalandığı gözlemlenmiştir.



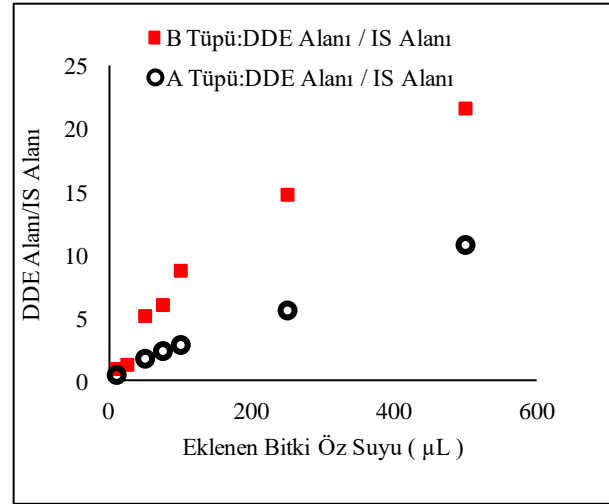
Şekil 4. Bitki Gövdesindeki DDE ve DDTs Konsantrasyonları (Shoot DDE and DDTs Concentrations)



Şekil 5. Bitki özsuğunda Bilinmeyen Kolloidal Yapı. A: Bir dakika Santrifuj 1000 rpm, B: Bir dakika Santrifuj 2000 rpm (Incidentally Discovered Colloidal Material. A: Centrifujed at 1000 rpm for 1 minute; B: Centrifujed at 2000 rpm for 1 minute)

Şekil 5'te görüldüğü gibi bu fazlar belirgin oranda BKYM içermektedir ve bu BKYM içeren kısımdan (Şekil 5' deki taralı gösterilen alan) alınan 10 µL, 50 µL, 100 µL, 250 µL, 500µL'lik bitki öz suları 2-mL GC şişelerine konuldu. Her bir şişeye 0,14 ppm İç Standard'tan 10 µL eklendikten sonra saf su ile hacmi 1 mL ye tamamlandı. Daha sonra bütün numunelere optimize edilen SPME metodu kullanılarak, GC/µ-ECD ile numunedeki p,p'-DDE ve İç Standard alanları hesaplandı. Hesaplanan

(p,p'-DDE Alan/ İç Standard Alanı oranları) ile eklenen µL beyaz maddeye karşı çizilen grafik (Şekil 6) da verilmiştir. Bütün numunelere ilave edilen İç satandard miktarı aynı olduğu için, (p,p'-DDE Alan / IS Alan) oranının artması, direk olarak ortamdaki p,p'-DDE alanının artması ve dolaylı olarak da p,p'-DDE konsantrasyonunun artması anlamına gelmektedir.

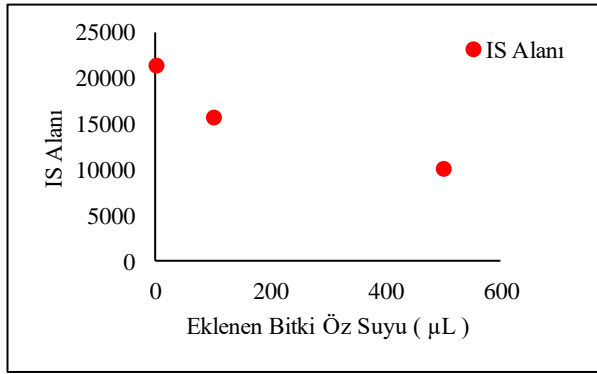


Şekil 6. Eklenen BKYM İçeren Bitki Özsuğuy Hacmi ile DDE Alanı/IS Alanı Oranındaki Değişim (The effects of Colloidal Whitish Material (CWM) addition in xylem saps on DDE Area over IS Area)

Şekil 5' de B tüpünde bitki öz suyundan kısmi ayrılan BKYM miktarı, A tüpünden kısmi olarak ayrılandan daha fazladır. Bu nedenle B tüpünden 2-mL GC şişelerine bitki öz suyu ile taşınan beyaz madde miktarı daha fazla olacaktır. Eğer p,p'-DDE türü kirlenmeler bu beyaz madde veya etrafındaki yapıya bir şekilde bağlanıyor ve taşınıyorsa, 2-mL GC vial içerisindeki sıvı fazda ölçülebilecek p,p'-DDE miktarında, B ve A tüplerinden eklenen hacme bağlı olarak artış gözlenecektir. (Şekil 6) dikkatli incelendiğinde eklenen bitki öz suyu (dolaylı olarak BKYM miktarının) hacminin artması ile, ölçülen p,p'-DDE alanı/IS alanının artış gösterdiği ve bitki öz suyu kökenli taşıma sisteminin olabileceğini destekleyen ilk ipuçlarını göstermektedir. (Şekil 6) deki dairesel noktalar, toplam 1 mL saf su içeren hacimde bulunan A tüpünden alınan bitki öz suyu kaynaklı beyaz maddeden gelen p,p'-DDE miktarlarını gösterirken, kareler ise B tüpünden gelen miktarı göstermektedir. Örneğin 100 µL beyaz madde içeren bitki öz suyu (Toplam hacim 1000 µL =100 µL bitki öz suyu+880 µL saf su +10 µL IS) eklendiğinde, p,p'-DDE Alan/IS Alan oranları A tüpü için 2,89 iken B tüpü için 8,79 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde eklenen bitki öz suyu miktarı, 250 µL bitki öz suyu ilavesi ile p,p'-

DDE Alan/IS Alan oranları artış göstererek, A tüpü için 5,83 ve B tüpü için 14,83 ulaşmıştır.

Şekil 6 'da B tüpünden alınan numunedeki p,p'-DDE konsantrasyonunun A'dan alınandan numunelerden yaklaşık 2,5 kat daha fazla olduğu açıkça görülmektedir. Başlangıçta A ve B tüpündeki bitki öz suları aynı bitkiye ait olduğu düşünülürse, p,p'-DDE miktarındaki artışın eklenen µL bitki özsuyu hacmi ile taşınan beyaz maddeden kaynaklandığının gösteren ilk deneysel ispat bu araştırma ile ispatlanmıştır. p,p'-DDE yi biriktirme potansiyeli yüksek olan Raven ve biriktirme özelliği az olan Zephyr bitki özsuğunun aynı hacimlerinden kısmı olarak ayrılan BKYM miktarı Raven için Zephyr den çok daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgu BKYM maddesinin p,p'-DDE bağlama özelliği üzerindeki şüpheleri daha da artırmıştır.



Şekil 7. Control Raven Bitki Öz Suyundaki IS Miktarındaki Değişim (Ratios of Internal Standard Areas in Xylem Saps of Control Raven Plant)

Bitki öz suyundaki bilinmeyen maddenin p,p'-DDE gibi kirleticileri bağlama özelliğini anlamak için yapılan ilave deneylerde, p,p'-DDE içermeyen toprakta (Kontrol Raven bitkileri) yetiştirilen Raven bitki öz suyu kullanılarak bunun bağlama özelliği test edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda Kontrol Raven bitkilerinin öz suyundaki p,p'-DDE tespit edilemedi. Kontrol bitki öz suyundan 0 µL, 100 µL, 500 µL alınarak her biri ayrı 2-mL GC viallere yerleştirildi. GC şişelerindeki sıvı hacmi 990 µL olacak şekilde saf su ilave edildi. Daha sonra her bir şişeye 10 µL 0.14 ppm İç Standard(İS) eklendi. Her bir numune SPME kullanılarak IS alanları GC/µECD yardımıyla ölçüldü. Bu veriler (Şekil 7) de gösterilmektedir. Şekil 7'de kontrol Raven bitki öz suyu olmayan durumda numunedeki IS alanı 21510 iken bu değer µL eklenen kontrol bitki öz suyu miktarı ile azalmaktadır. Örneğin 100 µL bitki öz suyunda IS alanı 15822 iken 500 µL eklendiğinde IS alanı yaklaşık %50 azalarak 10201



olarak ölçülmüştür. Yapılan bu çalışma ile Raven Kontrol bitki öz suyunda p,p'-DDE gibi kirleticileri bağlayabilen yapının olduğu IS bağlama özelliği ve bitki öz sularındaki beyaz madde miktarının numune içinde artması ile ölçülen p,p'-DDE miktarının artması ile ispatlanmıştır. Ancak bitki öz suyundaki bu BKYM maddenin tanımlanması, Fiziko-kimyasal özelliklerinin belirlenmesi ve bağlama şekli hakkında daha detaylı çalışmaların yapılması gerekmektedir.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] J.M. Armitage, F.A.P.C. Gobas, "A Terrestrial Food-chain Bioaccumulation Model for POPs", *Environ Sci Technol* 41 (11), 4019-4025, 2007.
- [2] E.C. Bizzotto, S. Villa, M. Vighi, "POP Bioaccumulation in Macroinvertebrates of Alpine Freshwater Systems", *Environ Pollut* 157 (12), 3192-3198, 2009.
- [3] M. Brustad, T.M.Sandanger, V. Andersen, E.Lund, "POP Exposure From Fish Liver Consumption and Risk of Cancer - The Norwegian Women and Cancer Study", *J Environ Monitor* 9 (7), 682-686,2007.
- [4] E. Deribe, B.O. Rosseland, R. Borgstrom, B.Salbu, Z. Gebremariam, E. Dadebo, H.R.Norli, O.M.Eklo, "Bioaccumulation of Persistent Organic Pollutants (POPs) in Fish Species From Lake Koka, Ethiopia: The Influence of Lipid Content and Trophic Position", *Sci Total Environ* 410, 136-145,2011.
- [5] H.J.Gao, X. Jiang, F. WangD.Z. Wang, Y.R. Bian, "Residual Levels and Bioaccumulation of Chlorinated Persistent Organic Pollutants (POPs) in Vegetables from Suburb of Nanjing, People's Republic of China", *B Environ Contam Tox* 74 (4), 673-680, 2005.
- [6] R.J. Norstrom, "Understanding Bioaccumulation of POPs in Food Webs - Chemical, Biological, Ecologicaland Environment Considerations", *Environ Sci Pollut R* 9 (5), 300-303, 2002.
- [7] L. Sheldon, M.Berry, D. Vallero, "Bioaccumulation of POPs in Fish and Estimation of Human Dietary Exposure and Dose", *Epidemiology* 10 (4), S169-S169, 1999.

- [8] D.L. Swackhamer, R. Pearson, A. Trowbridge, "Bioaccumulation and Cycling of Pops in The North American Great Lakes", *Epidemiology* 10 (4), S168-S168, 1999.
- [9] J. Klanova, N. Matykiewiczova, Z. Macka, P. Prosek, K. Laska, P. Klan, "Persistent Organic Pollutants in Soils and Sediments from James ROSS Island, Antarctica", *Environ Pollut* 152 (2), 416-423, 2008.
- [10] M. Chashchin, A. Kuzmin, B. Dayer, E. Barnes, U. Sichev, L. Abrutina, J.O. Odland, V. Chashchin, "POP Contamination in The Arctic: An Approach of Identification of Exposure Sources Based of Human Health Survey", *Epidemiology* 17 (6), S450-S450, 2006.
- [11] D. Muir, T. Savinova, S. Dahle, "Preface - POPS and Heavy Metal Contamination in the Russian Arctic Marine and Freshwater Environments", *Sci Total Environ* 306 (1-3), 1-2, 2003.
- [12] S.M.A.D. Zayed, I.Y. Mostafa, A.E. Elarab, "Chemical and Biological Release of C-14 Bound Residues from Soil Treated with C-14 P,P'-Ddt", *J Environ Sci Heal B* 29 (1), 169-175, 1994.
- [13] I. Cok, T.C. Durmaz, E. Durmaz, M.H. Satiroglu, C. Kabukcu, "Determination of Organochlorine Pesticide and Polychlorinated Biphenyl Levels in Adipose Tissue of Infertile Men", *Environ Monit Assess* 162 (1-4), 301-309, 2010.
- [14] O. Erdogrul, "Pesticide Residues in Liquid Pekmez (grape molasses)", *Environ Monit Assess* 144 (1-3), 323-328, 2008.
- [15] O. Erdogrul, A. Covaci, N. Kurtul, P. Schepens, "Levels of Organohalogenated Persistent Pollutants in Human Milk from Kahramanmaraş Region, Turkey", *Environ Int* 30 (5), 659-666, 2004.
- [16] M. İleyen, P. Sevim, M. Uslan, "DDX Profiles in Agricultural Fields Used for Cucurbit Production in Sakarya, Turkey", *Soil Sediment Contam* 22 (6), 689-700, 2013.
- [17] D. Kolankaya, "Organochlorine Pesticide Residues and Their Toxic Effects on the Environment and Organisms in Turkey", *Int J Environ an Ch* 86 (1-2), 147-160, 2006.
- [18] F. Nizamlioglu, A. Aktumsek, H. Kara, I. Dinc, "Monitoring of Some Organochlorine Pesticide Residues of Butter in Konya, Turkey", *J Environ Biol* 26 (2), 375-378, 2005.
- [19] C. Turgut, C., "The Contamination with Organochlorine Pesticides and Heavy Metals in Surface Water in Kucuk Menderes River in Turkey, 2000-2002", *Environ Int* 29 (1), 29-32, 2003.
- [20] H. Yavuz, G.O. Guler, A. Aktumsek, Y.S. Cakmak, H. Ozparlak, "Determination of Some Organochlorine Pesticide Residues in Honeys from Konya, Turkey", *Environ Monit Assess* 168 (1-4), 277-283, 2010.
- [21] S. Dagli, "Stockholm Convention and current situation on POPs in Turkey", *Nato Sci Peace Secur* 21-30, 2008.
- [22] H.L. Boul, M.L. Garnham, D. Hucker, D. Baird, J. Aislable, "Influence of Agricultural Practices on the Levels of Ddt and Its Residues in Soil", *Environ Sci Technol* 28 (8), 1397-1402, 1994.
- [23] X.R. Li, T.K. Zhao, S.J. Li, C.J. Zhang, "Residues and Sources of DDT and HCH in Agricultural Soils in The Suburb of Beijing China", *Adv Mater Res-Switz* 850-851, 1320-1325, 2014.
- [24] V.S. Semeena, J. Feichter, G. Lammel, "Impact of The Regional Climate and Substance Properties on The Fate and Atmospheric Long-Range Transport of Persistent Organic Pollutants - Examples of DDT and Gamma-HCH", *Atmos Chem Phys* 6, 1231-1248, 2006.
- [25] M. Alexander, "Aging, Bioavailability, and Overestimation of Risk from Environmental Pollutants", *Environ Sci Technol* 34 (20), 4259-4265, 2000.
- [26] B. Van Aken, P.A. Correa, J.L. Schnoor, "Phytoremediation of Polychlorinated Biphenyls: New Trends and Promises", *Environ Sci Technol* 44 (8), 2767-2776, 2010.
- [27] R. Kamath, J.A. Rentz, J.L. Schnoor, P.J.J. Alvarez, "Phytoremediation of Hydrocarbon-Contaminated Soils: Principles and Applications", *Stud Surf Sci Catal* 151, 447-478, 2004.
- [28] C. Bock, M. Kolb, M. Bokern, H. Harms, M. Mackova, L. Chroma, T. Macek, J. Hughes,

- C. Just, J.Schnoor, "Advances in Phytoremediation: Phytotransformation", *Nato Sci S Ss Iv Ear 15*, 115-140, 2002.
- [29] J.G. Burken, J.L. Schnoor, "Hybrid Poplar Tree Phytoremediation of Volatile Organic Compounds", *Abstr Pap Am Chem S 212*, 106-Agro, 1996.
- [30] A. Hulster, J.F. Muller, H. Marschner, "Soil-Plant Transfer of Polychlorinated Dibenzop-Dioxins and Dibenzofurans to Vegetables of The Cucumber Family (Cucurbitaceae)", *Environ Sci Technol 28* (6), 1110-1115, 1994.
- [31] J.C. White, "Differential Bioavailability of Field-Weathered p,p'-DDE to Plants of The Cucurbita and Cucumis Genera", *Chemosphere 49* (2), 143-152, 2002.
- [32] J.C. White, M.J.I. Mattina, B.D. Eitzer, W. Iannucci-Berger, "Tracking Chlordane Compositional and Chiral Profiles in Soil and Vegetation", *Chemosphere 47* (6), 639-646, 2002.
- [33] J.C. White, Z.D. Parrish, M. Isleyen, M.P.N. Gent, W. Iannucci-Berger, B.D. Eitzer, J.W. Kelsey, M. I. Mattina, "Influence of Citric Acid Amendments on The Availability of Weathered PCBs to Plant and Earthworm Species", *Int J Phytoremediat 8* (1), 63-79, 2006.
- [34] J.C. White, "Phytoremediation of Weathered p,p'-DDE Residues in Soil", *Int J Phytoremediat 2* (2), 133-144, 2000.
- [35] J.C. White, "Plant-Facilitated Mobilization and Translocation of Weathered 2,2-bis(p-chlorophenyl)-1,1-dichloroethylene (p,p'-DDE) from an Agricultural Soil", *Environ Toxicol Chem 20* (9), 2047-2052, 2001.
- [36] J. C. White, "Optimizing Planting Density for p,p'-DDE Phytoextraction by Cucurbita pepo", *Environ Eng Sci 26* (2), 369-375, 2009.
- [37] J.C. White, Z.D. Parrish, M. Isleyen, M.P.N. Gent, W. Iannucci-Berger, B.D. Eitzer, M.J.I. Mattina, "Uptake of Weathered p,p'-DDE by Plant Species Effective at Accumulating Soil Elements", *Microchem J 81* (1), 148-155, 2005.
- [38] J.C. White, Z.D. Parrish, M.P.N. Gent, W. Iannucci-Berger, B.D. Eitzer, M. Isleyen, M.I. Mattina, "Soil Amendments, Plant Age, and Intercropping Impact p,p'-DDE Bioavailability to Cucurbita Pepo", *J Environ Qual 35* (4), 992-1000, 2006.
- [39] Z.D. Parrish, J.C. White, M. Isleyen, M.P.N. Gent, W. Iannucci-Berger, B.D. Eitzer, J.W. Kelsey, M.I. Mattina, "Accumulation of Weathered Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) by Plant and Earthworm Species", *Chemosphere 64* (4), 609-618, 2006.
- [40] M.I. Mattina, M. Isleyen, B.D. Eitzer, W. Iannucci-Berger, J.C. White, "Uptake by Cucurbitaceae of Soil-Borne Contaminants Depends Upon Plant Genotype and Pollutant Properties", *Environ Sci Technol 40* (6), 1814-1821, 2006.
- [41] J.C. White, X.P. Wang, M.P.N. Gent, W. Iannucci-Berger, B.D. Eitzer, N.P. Schultes, M. Arienzo, M. I. Mattina, "Subspecies-Level Variation in The Phytoextraction of Weathered p,p'-DDE by Cucurbita Pepo", *Environ Sci Technol 37* (19), 4368-4373, 2003.
- [42] M.I. Mattina, W.A. Berger, B.D. Eitzer, "Factors Affecting The Phytoaccumulation of Weathered, Soil-Borne Organic Contaminants: Analyses at The Ex Planta and in Planta Sides of The Plant Root", *Plant Soil 291* (1-2), 143-154, 2007.
- [43] M. Isleyen, P. Sevim, J.C. White, "Accumulation of Weathered p,p'-DDTs in Grafted Watermelon", *J Agr Food Chem 60* (4), 1113-1121, 2012.
- [44] M. Isleyen, P. Sevim, "Accumulation of Weathered P,P'-Dde in Xylem Sap of Grafted Watermelon", *Int J Phytoremediat 14* (4), 403-414, 2012.
- [45] J.C. White, "Inheritance of p,p'-DDE Phytoextraction Ability in Hybridized Cucurbita pepo Cultivars", *Environ Sci Technol 44* (13), 5165-5169, 2010.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 01.12.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 28.06.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.270688	

## Nano boyutlu sıfır değerlikli demir ile sulu ortamlarda klortetrasiklin giderim mekanizmasının incelenmesi

Hande Türk <sup>\*1</sup>, Özge Hanay<sup>2</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada kimyasal indirgeme yöntemi ile hazırlanan nano ölçekli sıfır değerlikli demir (nZVI) ile klortetrasiklinin (CTC) sulu ortamlardaki giderim mekanizması incelenmiştir. Çözelti pH'ı, nZVI dozajı, temas süresi ve reaksiyon sıcaklığı sistematik olarak incelenmiş ve maksimum klortetrasiklin gideriminin gerçekleştiği optimum işletme şartlarında klortetrasiklin parçalanma ürünleri belirlenmiştir. Adsorpsiyon davranışının pH'a bağlı olduğu tespit edilmiş ve klortetrasiklinin maksimum giderim verimi pH 6' da gerçekleşmiştir. 0,4-0,6 g/L aralığındaki nZVI dozajlarında giderim veriminde önemli değişiklik gözlenmediği için optimum dozaj 0,4 g/L olarak belirlenmiştir. Adsorpsiyon kinetiğinin 2 saat içerisinde dengeye ulaştığı ve yalancı ikinci dereceden hız modeline uyduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Nano ölçekli sıfır değerlikli demir (nZVI), Klortetrasiklin (CTC), Adsorpsiyon

### The evolution of removal mechanism of chlortetracycline by nanoscale zero valent iron from aqueous solution

#### ABSTRACT

In this study, the removal mechanism of chlortetracycline (CTC) by nanoscale zero valent iron (nZVI) from the aqueous solutions. Experimental variables such as solution pH, nZVI dosage, contact time and reaction temperature were systematically studied and the degradation products of CTC were determined at optimum operating conditions which provided to maximum CTC removal percentages. Adsorption behavior depended pH and maximum removal of CTC occurred at pH 6. The optimum dosage was 0,4 g/L because there was no significant removal efficiency when nZVI dosage was between 0,4-0,6 g/L. Adsorption kinetics exhibited that equilibrium was reached within 2 h following the pseudo-second order model.

**Keywords:** Nanoscale zero valent iron (nZVI), Chlortetracycline (CTC), Adsorption

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Elazığ - hande.turk89@gmail.com

<sup>2</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Elazığ - ozge.hanay@gmail.com

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Antibiyotikler, günümüz ilaç sektöründe önemli bir grup olarak yer almaktadırlar. İnsanların tedavi edilmesinin yanı sıra hayvan sağlığının korunması ve üretim veriminin artırılması amacıyla da yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Organizmaya uygulanan antibiyotikler % 90'a varan oranlarda metabolize edilmeden vücuttan atılırlar [1]. İlaç uygulanan hayvanların idrar ve dışkılarında önemli düzeyde ana bileşik veya metabolit bulunabilir. Bu nedenle, özellikle dışkıların tarım arazilerinde gübre olarak kullanılması sonucu, bu alanlarda antibakteriyel ilaç kirliliği oluşur [2].

Tetrasiklinler (TCs), veteriner hekimlikte yaygın olarak kullanılan geniş spektrumlu antibakteriyel maddelerdir. Bunlar, gram pozitif ve gram negatif bakterilerin birçoğunun yanı sıra mikoplazma ve Chlamydia gibi organizmaların bir kısmına karşı aktiflerdir. Tetrasiklin (TC), oksitetrasiklin (OTC) ve klortetrasiklin (CTC) birçok ülkede hayvan sağlığını korumak ve büyüme verimliliğini artırmak için hayvan beslemede kullanılır. Bu kimyasallar, karboksamid fonksiyonel grubu ile kısmen konjuge dört halka yapısı ile karakterize edilirler [3]. Tetrasiklin molekülü çeşitli iyonlaşabilen fonksiyonel gruplara sahiptir ve bu molekülün yükü çözelti pH'ına bağlıdır [4].

Tetrasiklin antibiyotiklerinin belli şartlar altında stabil olmadığı bilinmektedir. Aynı zamanda tetrasiklinlerin uzun süre bekletilmesi ile abiotik dönüşümler; izomerizasyon dehidratasyon, yer değiştirme ve oksijenle etkileşimler oluşabilmektedir [5]. Tetrasiklinlerin parçalanma ürünlerinin oluşumu, ortam pH'ına ve ışığa maruziyete de bağlıdır. pH: 3-6.5 aralığında tetrasiklinlerin epimerik formları ve anhidro formları oluşabilir ve nötre yakın ve zayıf alkali şartlarda (pH: 6.5-9) ise daha yavaş olarak epimerizasyon gerçekleşebilir [6]. Bu parçalanma ürünlerini belirlemek çevresel risk değerlendirilmesi açısından önemlidir.

Sıfır değerlikli demir (ZVI); demirin ucuz, toksik olmaması ve çevreye uygun olması gibi özellikleri nedeniyle cazip bir arıtım alternatifidir. Nanopartiküller, eşsiz kimyasal özellikleri sayesinde çeşitli kirleticilerin ıslahı için caziptir [7,8]. Nanopartiküllerin reaktivitesi, yüzey alanının artması ile artar [9,10]. Son yıllarda suda bulunan klorlu bileşikler, pestisitler, ağır metaller, nitrat ve patlayıcıları içeren çeşitli yeraltı suyu

kirleticilerini gidermek için mikropartiküller (mZVI), demir tozu, ZVI nanopartikülleri kullanılmaktadır. Küçük partikül boyutu ve yüksek reaktivitesi nedeniyle kirlenmiş toprakların, sedimentlerin ve biyokatıların ıslahında da kullanılmaktadır.

Bu çalışmada nano boyutlu sıfır değerlikli demirin yukarıda belirtilen özelliklerinden faydalanmak için tetrasiklin antibiyotiklerinden olan klortetrasiklinin (CTC), nano boyutlu demir partikülleri ile indirgenmesi araştırılmıştır. Bu amaçla laboratuvar şartlarında elde edilen nZVI ile farklı pH, sıcaklık ve nZVI dozajına bağlı olarak klortetrasiklinin reaksiyon kinetiği, parçalanma ürünleri ve son ürünleri incelenerek sulardan giderim potansiyeli detaylıca değerlendirilmiştir.

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Sıfır değerlikli nano boyuttaki demirin hazırlanması (Preparation of nanoscale zero valent iron)

Bu işlemde öncül madde olarak 500 mL'lik 71,7 mM Fe<sup>3+</sup>, FeCl<sub>3</sub> kimyasalından (Merck) hazırlanmıştır. İndirgen madde olarak 500 mL'lik 358,5 mM BH<sub>4</sub><sup>-</sup> ise NaBH<sub>4</sub>'den (Merck) hazırlanmıştır. Böylelikle her iki maddenin konsantrasyonları oranı (1:5) olarak ayarlanmıştır. Reaksiyon ise dört boyunlu altı düz tabanlı cam kaptaki gerçekleştirilmiştir. Dört boyunlu cam kabın bir boynundan manyetik karıştırıcının pervanesi geçirilmiş, diğerinden NaBH<sub>4</sub> çözeltisi verilmiş, kalan ikisinden de azot gazının giriş ve çıkışı sağlanmıştır. Bu sentez işleminde indirgen maddenin ortama verilme hızı yukarıda açıklandığı gibi partikülün birçok özelliğini önemli ölçüde değiştirdiğinden çalışmada 20 mL/dak olacak şekilde uygulanmıştır. Eşit hacimdeki (500 mL) FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O çözeltisine 250 rpm'de çalıştırılan manyetik karıştırıcı altında eşit hacimdeki NaBH<sub>4</sub> çözeltisi eklenmiştir.

Elde edilen siyah çökelek sıfır değerlikli demirin oluştuğunu göstermiştir. Daha sonra nZVI vakum filtrasyonu ile 30 dakika sonunda çözüldüğü ayrılmış ve toplanan nZVI üç kez etanol ile yıkanarak analizde kullanılmaya kadar etanol içerisinde, buzdolabında bekletilmiştir. Daha sonra anaerobik poşet içerisinde sürekli azot gazı altında kurutmaya tabi tutulmuştur.

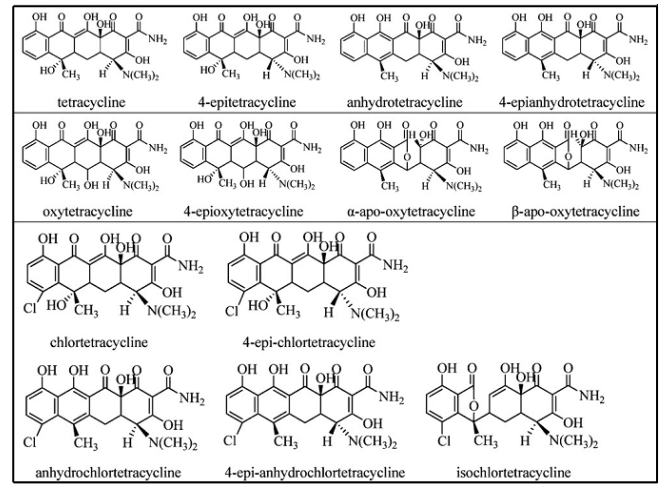


## 2.2. Kesikli deney serileri (Batch experiment series)

Klortetrasiklinin (CTC) indirgenmesi çalışmaları; sentetik olarak hazırlanan çözeltilerde yapılmıştır. Applichem ve Sigma firmalarından temin edilen bu bileşiklerin hidrokloritlerinden çözeltiler hazırlanmıştır. nZVI'nın oksitlenmemesi için klortetrasiklin ile hazırlanan tüm çözeltiler için azot gazı geçirilmiş distile su kullanılmıştır. Farklı konsantrasyonlarda hazırlanan bu çözeltilere sıfır değerlikli nano ölçekli demir eklenmesiyle deney serileri başlatılmıştır. Klortetrasiklin bileşiklerinin abiyotik koşullardan oldukça etkilendiği belirtilmiştir [11]. Bu nedenle ışığın etkisiyle oluşabilecek parçalanmaları engellemek amacıyla süspansiyonların bulunduğu cam şişeler alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Ayrıca stok çözeltiler, deneylerde kullanılıncaya kadar +40 C'de buzdolabında saklanmıştır. Farklı reaksiyon süreleri sonunda alınan örnekler 0.22 µm membran filtrelerden geçirilerek bekletilmeden HPLC'de analizlenmiştir. Analizler 3 tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmadaki deney serilerinde izlenen aşamalar şu şekildedir;

- 1) Farklı başlangıç pH değerleri: 2-9 arasında değişen farklı başlangıç pH değerlerinde giderim verimleri araştırılmıştır.
- 2) Farklı miktarlardaki nano Fe<sup>0</sup>; sabit bir konsantrasyondaki çözeltilere 0.1-1 g/L aralığında değişen farklı miktarlarda ilave edilerek reaksiyonlar başlatılmıştır.
- 3) Farklı reaksiyon sıcaklıkları; 30, 45 ve 60 0C aralığında değişen farklı sıcaklıklardaki giderim verimleri araştırılmıştır.
- 4) Farklı reaksiyon süreleri; partiküllerin maksimum adsorpsiyon kapasitesini, reaksiyon kinetiğini belirlemek amacıyla 5 dak. ile 480 dak. gibi farklı zaman aralıklarında örneklemeler yapılmıştır.

Klortetrasiklin için 4-epi-klortetrasiklin (ECTC), anhidroklortetrasiklin, 4-epi-anhidroklortetrasiklin, isoklortetrasiklin ara ürünleri araştırılmıştır. Tetrasiklinler ve parçalanma ürünlerinin kimyasal yapıları Şekil 1'de gösterilmiştir.

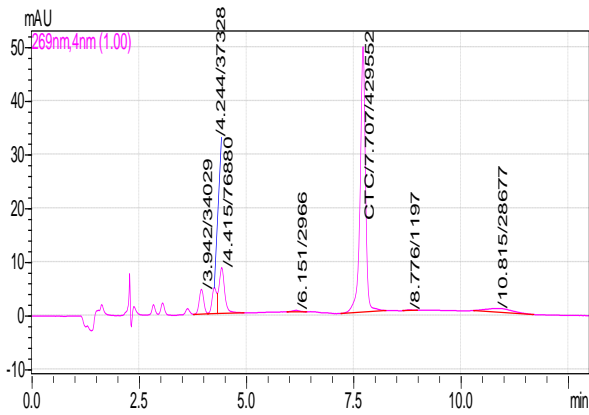


Şekil 1. Tetrasiklinler ve parçalanma ürünlerinin kimyasal yapıları (Chemical structures of tetracyclines and their degradation products)

Bu deney serilerinin her birinde kontrol çalışmaları yapılmıştır. nZVI ilavesi olmayan, farklı pH çalışmasının yapıldığı deney serilerinde başlangıç klortetrasiklin konsantrasyonları analizlenmiştir. Aynı zamanda ara ürünler için de nZVI ilavesi olmayan deney serileri kontrol amaçlı gerçekleştirilmiştir.

## 2.3. Klortetrasiklin analizi (Chlortetrasiklin analysis)

Klortetrasiklin analizi Yüksek Performanslı Sıvı Kromatografisi (HPLC) (Shimadzu) ile gerçekleştirilmiştir. HPLC'deki metot geliştirme denemeleri neticesinde alıkonma süresi olası en küçük değere indirilmiştir. Metotta mobil faz olarak amonyum dihidrojen fosfat/asetonitril (20/80, v/v) karışımı kullanılmıştır. Mobil fazın pH değeri 2.45-2.55 aralığında tutulmuştur. Akış hızı 1,2 mL/dak. dedektör dalga boyu: 269 nm ve örneklem hacmi ise 100 µL olarak ayarlanmıştır. Kolonun tipi ise AllureBiPh 5µm, 150x4.6 mm idi. Bu metoda göre alıkonma süresi klortetrasiklin için 7,07 dak. olarak belirlenmiştir. Klortetrasiklinin kromatogramları Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Klortetrasiklin kromatogramları (Chromatography of chlortetracycline)

### 2.3.1. Klortetrasiklin ara ürünlerinin analizi (Analysis transformation products of chlortetracycline)

Klortetrasiklin ara ürünlerinin belirlenmesi amacıyla LC-MS-MS (Shimadzu) ile metot geliştirme çalışmaları sonucunda gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen metotta şartlar aşağıdaki gibidir;

Mobil faz A: Su+ % 0,1 formik asit

Mobil faz B: Metanol+ % 0,1 formik asit

Akış hızı: 0,2 mL/dak

Enjeksiyon süresi: 15 dak

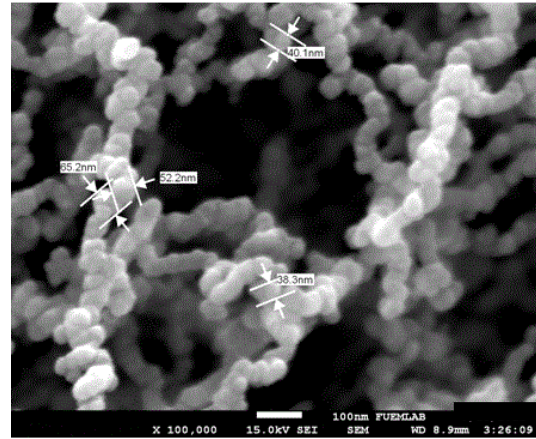
Enjeksiyon hacmi: 1000 µL

Kolon sıcaklığı: 400C, Kolon Tipi: Venusil XBP C18, (3µm, 100Å, 2,1x50mm).

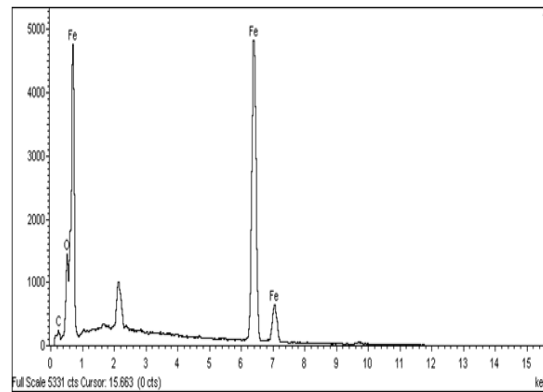
## 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

### 3.1. SEM ve EDX analiz sonuçları (SEM and EDX analysis results)

Nano ölçekli hazırlanan sıfır değerlikli demirin morfolojisi ve partikül boyutu SEM ile belirlenmiştir. Aynı zamanda EDX analizi yapılarak elementel yapıları belirlenmiştir. Bu veriler, nZVI için Şekil 3 ve Şekil 4'te sunulmuştur.



Şekil 3. Nano boyutlu ZVI'nın SEM görüntüsü (SEM image of nanoscale ZVI)



Şekil 4. Nano boyutlu ZVI'nın EDX grafiği (EDX graphic of nanoscale ZVI)

Şekil 3'te görüldüğü gibi, sentezlenen nZVI partikülleri üniform bir yapıda olup, bağlı bir zincir görünümüne sahiptir. Zincir benzeri yapılar hem statik manyetizm hem de yüzey geriliminin etkisinden kaynaklanmaktadır. Bazı büyük boyutlu nanopartiküller ise manyetik özelliklerinden dolayı nanopartiküllerin aglomerasyonundan kaynaklanmaktadır. Çünkü bu tip agregasyon demir partikülleri arasındaki manyetik etkileşimlerle alakalıdır. [12], [13] ve [14] sentezledikleri nZVI için aynı durumu belirlemişlerdir.

Çalışmamızda nano boyutta sentezlenen ZVI için partikül boyutunun 38-65 nm aralığında olduğu belirlenmiştir. Tablo 1'de nano boyutta sentezlenen ZVI için EDX grafiği ve % olarak ağırlıkça ve atomik değerleri verilmiştir. Buna göre elementel analiz sonucunda % 1,75 oranında C, % 6,39 oranında O ve % 91,87 oranında ise Fe elementi tespit edilmiştir. nZVI sentezi azot gazı altında gerçekleştirilmesine rağmen örneklerin SEM ve EDX analizi esnasında havayla temasından dolayı ağırlıkça yaklaşık % 6 oranında oksijen tespit edilmesi deneysel şartlardan kaynaklandığını düşündürmektedir.

Table 1. Nano boyutlu ZVI için % olarak ağırlıkça ve atomik değerleri (Weight and atomic values % for nanoscale ZVI)

Element	%, Ağırlıkça	%, Atomikçe
C	1.75	6.64
O	6.39	18.23
F	91.87	75.12
Toplam	100.00	100.00

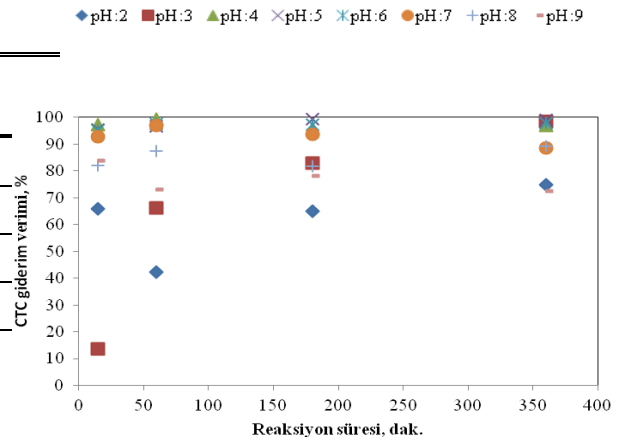
Bunun yanısıra yüzey alanı ve numunenin pH'ına bağlı zeta potansiyeli analizleri gerçekleştirilmiştir. Partiküllerin  $pH_{zpc}$  değeri 5,38 ve yüzey alanı 25 m<sup>2</sup>/g olarak bulunmuştur. pH: 6'da nZVI yüzeyi  $pH_{zpc}$ 'si 5.38 olduğundan dolayı bu pH değerlerinde katyonik yüklere sahip olacaktır ve diğer taraftan klortetrasiklin ise anyonik türlerde mevcut olacaktır.

### 3.2. nZVI ile klortetrasiklin giderimine pH'nın etkisi (The effect of pH on removal of chlortetracycline with nZVI)

Başlangıç klortetrasiklin konsantrasyonu 60 mg/L, sıcaklık: 30 oC ve nZVI dozajı: 0.4 g/L olacak şekilde pH: 2-9 aralığında deney serileri yürütülmüştür.

Şekil 5'ten de görülebileceği gibi başlangıç en yüksek giderim verimi pH:6 'da daha kısa sürede elde edilmiştir. pH: 6'da giderim veriminin yüksek olması klortetrasiklin ile nZVI arasında güçlü bir elektrostatik çekimin olduğunu göstermektedir.

Çalışmada reaksiyon sonundaki son pH değerlerine de bakılmıştır (Tablo 2). Özellikle son pH değerleri başlangıç pH değerlerinin düşük olduğu pH değerlerinde daha fazla artış gözlenmiştir. Örneğin başlangıç pH'ı 3 ve 4 olan şartlarda son pH değerleri yaklaşık iki birim artarak daha yüksek son pH değerleri gözlenmiştir. Bu durum düşük pH değerlerinde demir korozyonunun daha hızlı gerçekleşmesiyle açığan çıkan OH<sup>-</sup> iyonlarından kaynaklanabilir. Sonuç olarak nZVI ile yapılan optimum pH sonuçlarına bakılarak giderim mekanizmasının daha çok elektrostatik çekime dayalı bir adsorpsiyon olayına bağlı olduğu düşünülmektedir. Bununla beraber nZVI'nın bir çok organik ve inorganik bileşikler indirgeme özelliğine de sahip olduğu yapılan birçok çalışmada belirtilmiştir.



Şekil 5. CTC giderimine pH'nın etkisi (nZVI dozajı 0,4 g/L, Co(CTC): 60 mg/L, T: 30 °C) (Effect of pH on CTC removal)

Tablo 2. Reaksiyondan önce ve sonra pH değerleri (pH values before and after the reaction)

Başlangıç pH'sı	Son pH
2	2,19
3	5,05
4	5,70
5	6,78
6	6,97
7	7,38
8	7,97
9	8,15

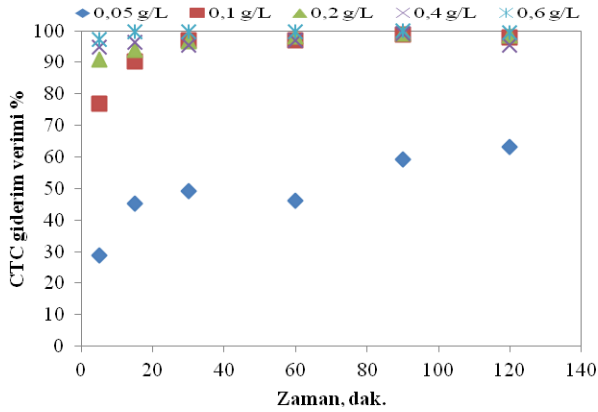
### 3.3. nZVI dozajının etkisi (Effect of nZVI dosage)

Çalışmanın bu aşamasında farklı nZVI dozajlarında klortetrasiklin giderim verimleri araştırılmıştır. Buna göre 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 ve 0.6 g/L nZVI için optimum pH değerlerinde (pH: 6) ve 60 mg/L başlangıç konsantrasyonunda deneyler yürütülmüştür. Şekil 6'da klortetrasiklin için yüksek giderim verimleri nZVI dozajının artırılmasıyla gözlenmiştir.

Düşük nZVI konsantrasyonlarında giderimin düşük, yüksek nZVI konsantrasyonlarında giderimin yüksek olması nZVI yüzey alanının artmasıyla ilgilidir. Daha yüksek konsantrasyonlarda nZVI, daha fazla yüzey alanına sahiptir bu durum da klortetrasiklin ile etkileşime girebilecek daha fazla reaktif alan anlamına gelmektedir. Düşük konsantrasyonlarda nZVI eklenmesi, reaktif alanın az olacağı

anlamına gelir ve bu da tetrasiklinlerin giderim verimliliğini düşürmüştür.

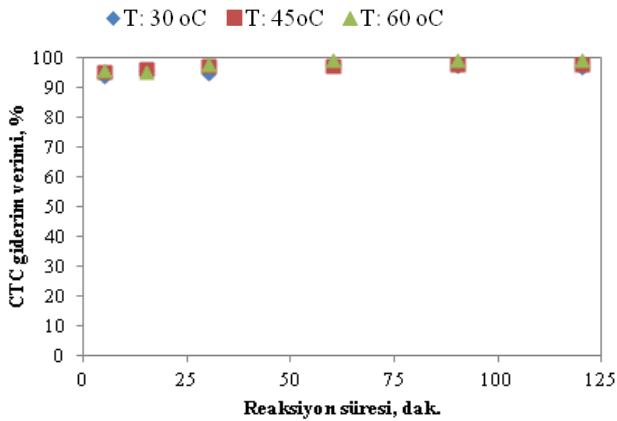
CTC giderimi için 0.4-0.6 g/L nZVI konsantrasyonlarında birbirine çok yakın giderim verimleri elde edilmiştir. Bu nedenle daha düşük konsantrasyon 0.4 g/L'nin seçilmesi uygun görülmüştür. Reaksiyon süresinin artması 0.4-0.6 g/L için giderimi çok fazla arttırmamıştır.



Şekil 6. CTC giderimine nZVI dozajının etkisi ( $C_{0(CTC)}$ : 60 mg/L, pH: 6, T: 30°C) (Effect of nZVI dosage on CTC removal)

### 3.4. Sıcaklığın etkisi (Effect of temperature)

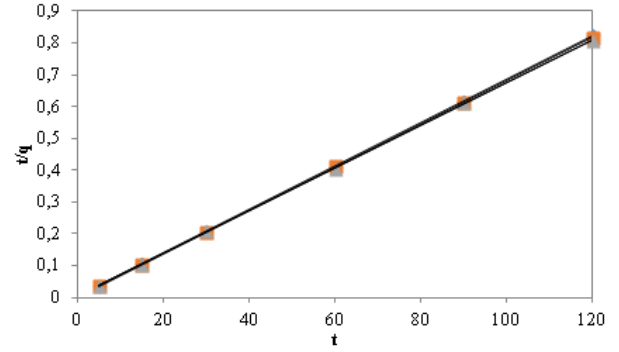
Klortetrasiklin bileşiği sıcaklık değişiminden neredeyse hiç etkilenmemekle beraber her 3 sıcaklıkta da birbirine yakın giderimler elde edilmiş ve reaksiyon süresinin artışı da giderimde büyük değişimlere yol açmadığı gözlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. CTC giderimine sıcaklığın etkisi ( $C_{0(CTC)}$ : 60 mg/L, pH: 6, nZVI dozajı: 0.4 g/L) (Effect of temperature on CTC removal)

### 3.5. nZVI ile kinetik çalışma sonuçları (Kinetic study results with nZVI)

Yalancı birinci dereceden ve ikinci dereceden nZVI ile CTC için reaksiyonlar için hız kinetikleri hesaplanmış ve reaksiyon hız kinetikleri 2. dereceden yalancı hız eşitliği için Şekil 8'de gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde reaksiyonlar için hız kinetiği yalancı 2. dereceden hız eşitliğine uyum sağlamıştır.



Şekil 8. Farklı sıcaklıklarda yalancı ikinci dereceden adsorpsiyon kinetiği (Pseudo second-order adsorption kinetics at different temperatures)

Deneyssel elde edilen denge değerleri ile hesaplanan denge değerleri birbirleri ile uyumludur. Tüm sıcaklıklar için yapılan hesaplamalar Tablo 3'te ayrıntılı olarak verilmiştir. Buna göre CTC için 30, 45 ve 60 oC sıcaklıklarda bulunan maksimum qden değerleri sırasıyla 146.15, 146.75 ve 147.53 mg/g olarak bulunmuştur.

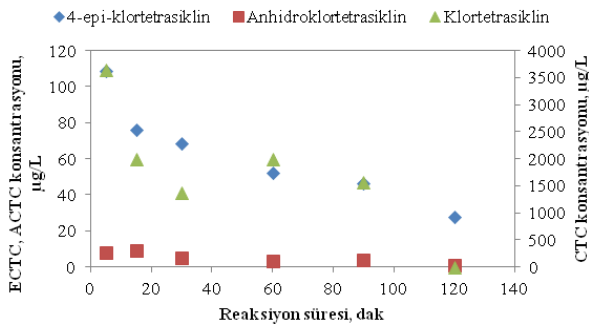
Tablo 3. Sıcaklık değişimi ile 1. ve 2. dereceden reaksiyon hız sabitleri (Reaction speed constant 1st and 2 rd with temprature change)

T °C	qden deneysel (mg/g)	1. dereceden kinetik model			2. dereceden kinetik model		
		k <sub>1</sub> (l/dk)	qden hesaplanan (mg/g)	R <sup>2</sup>	k <sub>2</sub> (l/dk)	qden hesaplanan (mg/g)	R <sup>2</sup>
30	146.15	0.019	1.94	0.900	0.024	147.05	0.999
45	146.75	0.0009	1.12	0.0069	0.077	147.05	1
60	147.53	0.007	1.34	0.414	0.024	149.25	0.999

### 3.6. Klortetrasiklin parçalanma ürünleri (Degradation products of chlortetracycline)

Tetrasiklin antibiyotiklerinin belli şartlar altında kararlı olmaması ve uzun süre bekletilmesi sonucunda abiotik dönüşümler; izomerizasyon dehidratasyon, yer değiştirme ve oksijenle etkileşimlerle oluşabilmektedir [5]. Tetrasiklinlerin parçalanma ürünlerinin oluşumu, ortam pH'ına ve ışığa mağruziyete de bağlıdır. pH: 3-6.5 aralığında tetrasiklinlerin epimerik formları ve anhidro formları oluşabilir ve nötre yakın ve zayıf alkali şartlarda (pH: 6.5-9) ise daha yavaş olarak epimerizasyon gerçekleşebilir [6]. Klortetrasiklin için belirlenen ara ürünler ise şunlardır;

4-epi-klortetrasiklin (ECTC),  
anhidroklortetrasiklin (ACTC),  
4-epi-anhidroklortetrasiklin (EACTC) (Şekil 9).

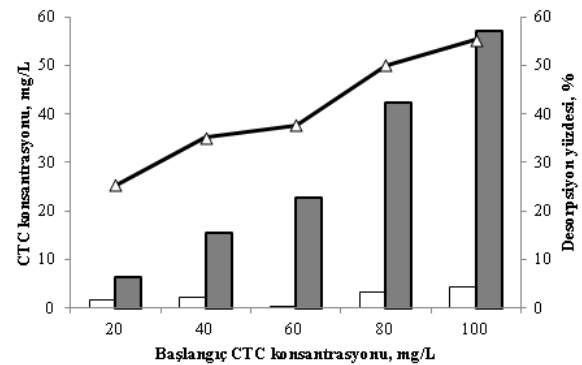


Şekil 9. nZVI ile CTC ara ürünlerinin oluşumu (Formation of CTC intermediates with nZVI)

### 3.8. Desorpsiyon sonuçları (Desorption results)

Çözelti ortamında farklı reaksiyon sürelerinde alınan numunelerde ara ürünlerin konsantrasyon değerlerinin düşük bulunmasından dolayı, reaksiyon sonunda desorpsiyon işlemi yapılarak

özellikle ara ürünlerin sorpsiyon davranışları incelenmeye çalışılmıştır. HCl asit işlemi ile gerçekleştirilen desorpsiyon çalışmasında ara ürünlerin reaksiyon süresince sulu ortamda çok düşük konsantrasyonlarda bulunmasına karşılık özellikle desorpsiyon işlemindeki konsantrasyon değerleri daha yüksek bulunmuştur. Bu nedenle bu bileşiklerin kısmen oluştuğu ve oluşan bu ürünlerin çok kısa zaman aralığında adsorplandığı sonucuna varılmıştır. Desorpsiyon miktarları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Desorpsiyon miktarları (Desorption amounts)

## 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan bu çalışma; yüzeysel ve yer altı sularından klortetrasiklin antibiyotik içeren bileşiklerin gideriminde nZVI partiküllerinin kullanımının etkili olacağını göstermiştir. Böylece su kaynaklarının korunması ve içme suyu temin edilecek kaynaklardan uzaklaştırılması ve bu atıksuların yeniden kullanımı mümkün olacaktır. Kullanılacak yöntemin ileri bir arıtma tekniği olarak ikincil arıtma çıkış sularına uygulanabilmesi ve dolayısıyla tarımsal sulamada kentsel atıksuların daha güvenli olarak yeniden kullanılması yönünden de önemli bir durumdur.

Bu çalışma ile sıfır değerlikli demir, klortetrasiklin giderimi için kullanılmasında



düşük dozaj uygulamalarında bile etkili olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda bu partiküllerin kolay temini edilebilirliği ya da kolaylıkla laboratuvar ortamında sentezlendiği için uygulamada ekonomik bir seçenektir.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yapılan bu çalışma TÜBİTAK tarafından 111Y092 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

### KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] N. Kemper, "Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment", *Ecological Indicators*, vol. 8, no. 1, pp. 1-13, 2008.
- [2] B. H. Sorensen, N. Nielsen, S. N. Nielsen, P. F. Lanzky, Ingerslev, F., H. C. Holten Luzthoft, S. E. Jorgensen, "Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment- a review", *Chemosphere*, vol. 36, no. 2, pp. 357-393, 1998.
- [3] L. A. Mitscher, "The Chemistry of the Tetracycline Antibiotics", Marcel Decker Inc., New York, vol. 9, pp. 330, 1978.
- [4] A. K. Sarmah, M. R. Meyer, A. B. A. Boxall, "A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment", *Chemosphere*, vol. 65, no. 5, pp. 725-759, 2006.
- [5] H. Chen, C. H. Huang, "Adsorption and transformation of tetracycline antibiotics with aluminum oxide", *Chemosphere*, vol. 79, no. 8, pp. 779-785, 2010.
- [6] H. Sorensen, B. Nielsen, G. Sengeleov, J. Tjornelund, "Toxicity of tetracyclines and tetracycline degradation products to environmentally relevant bacteria, including selected tetracycline-resistant bacteria", *Achieved Environmental Contamination Toxicology*, vol. 42, no. 3, pp. 263-271, 2002.
- [7] W. X. Zhang, "Nanoscale iron particles for environmental remediation: an overview", *J. Nanopart. Res.*, vol. 5, no. 3-4, pp. 323-332, 2003.
- [8] W. X. Zhang, "Nanoscale environmental science and technology: challenges and Opportunities", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 39, pp. 94A-95A, 2005.
- [9] J. K. Gottpagar, E. A. Grulke, E. A. Tsank, D. Bhattacharyya, "Reductive dehalogenation of trichloroethylene using zero-valent iron", *Reductive dehalogenation of trichloroethylene using zero-valent iron*, *Environ. Progr.*, vol 6, no. 2, pp. 137-143, 1997.
- [10] F. Li, C. Vipulanandan, K. K. Mohanty, "Microemulsion and solution approaches to nanoparticle iron production for degradation of trichloroethylene", *Coll. Surf. A.*, vol. 223, no. 1-3, pp. 103-112, 2003.
- [11] M. Seifrtova, L. Novakova, C. Lino, A. Pena, P. Solich, "An overview of analytical methodologies for the determination of antibiotics in environmental waters ", *Analytica Chimica Acta.*, vol. 649, no.2 pp. 158-179, 2009.
- [12] C. Wang, W. Zhang, "Nanoscale metal particles for dechlorination of PCE and PCBs", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 35, pp. 4922, 1997.
- [13] Y. H. Shih, Y. T. Tai, " Reaction of decabrominated diphenyl ether by zerovalent iron nanoparticles", *Chemosphere*, vol. 78, no. 10, pp. 1200-1206, 2010.
- [14] T. Phenrat, N. Saleh, K. Sirk, R. D. Tilton, G. V. Lowry, "Aggregation and sedimentation of aqueous nanoscale zero valent dispersion", *Environ. Sci. Technol.*, vol. 41, no. 1, pp. 284-290, 2007.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 27.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 06.07.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.300851	

## Yaşam döngüsü analizinin ambalaj atıklarının yönetiminde kullanılması

Aliye Suna Erses Yay\*<sup>1</sup>

### ÖZ

Sakarya-Serdivan ilçesi ambalaj atıkları yönetiminin çevresel etkilerini yaşam döngüsü analizi (YDA) ile belirlemek bu çalışmanın ana amacıdır. Yaşam döngüsü analizinde Simapro 8.02 yazılımı ve CLM-IA etki kategorisi kullanılmıştır. Çalışmanın fonksiyonel birimi olarak Sakarya-Serdivan’da toplanan 1 ton ambalaj atığı ele alınmıştır. Sistem sınırları ambalaj atığının toplanması, toplama-ayırma-geri dönüşüm tesisine nakliyesi, karışık ambalaj atıklarının ayrılması, kağıt, karton, metalin preslenip geri dönüşüm firmalarına satılması, plastik atıkların granül hale getirilmesi ve satılması, cam atıkların preslenmeden ilgili firmalara satılması, geri kalan artıkların veya geri dönüştürülemeyen malzemelerin düzenli depolamada bertarafıdır. Bu çalışmada ambalaj atığı yönetimi için 3 senaryo kurgulanmış olup, senaryolardan ikisinde gerçek ve yönetmelikte olması gereken oranlarda geri dönüşüm yapılırken, son senaryoda hiç geri dönüştürülmeden düzenli depolamaya gönderilmektedir. Sonuçlara baktığımızda, ambalaj atıklarının depolanması en kötü bertaraf alternatifidir. En büyük olumsuz etkide tatlı su ve deniz ekotoksitesitesi ile ozon tabakasının tahribatı ve fosil yakıtların abiyotik tüketiminde hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** ambalaj atıkları, atık yönetimi, yaşam döngü analizi (YDA)

## The use of life cycle analysis on the packaging waste management

### ABSTRACT

The aim of this study is to determine the environmental impacts of the packaging waste management for Sakarya-Serdivan by using life cycle analysis (LCA). Simapro 8.02 software with CLM-IA impact category was used to perform the LCA. Functional unit was considered as one ton of packaging waste collected in Sakarya-Serdivan. System boundaries include collection of packaging waste, transportation into sorting-recycling plant, separation of mixed packaging waste, sale of pressed papers, cardboards, metals and unpressed glasses to the relevant companies and recycling of plastics into granulate form and disposal of residual waste or non-recyclable materials by landfilling. In the study, 3 scenarios were modeled for packaging waste management. While packaging wastes are recycled at real and the regulation rates for two scenarios, landfilling of packaging waste without any recycling are focused on the last scenario. According to the results, landfilling of packaging waste is the worst alternative. It was observed higher negative impacts in the freshwater aquatic ecotoxicity, marine aquatic ecotoxicity, ozone layer depletion and abiotic depletion (fossil).

**Keywords:** packaging waste, waste management, life cycle analysis (LCA)

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, erses@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya üzerinde katı atık miktarının artan nüfus ve refah seviyesi, gelişen teknoloji, ekonomik büyüme, sanayileşme ve kentleşme sonucunda her geçen gün arttığı bilinen bir gerçektir. İnsanların değişen yaşam standartları, tüketim alışkanlıkları ve ekonomik seviyelerinin değişmesine paralel olarak atık kompozisyonları da değişmektedir. Atık kompozisyonunun değişmesiyle katı atık içerisinde önemli bir orana sahip olan ambalaj atıklarının sürdürülebilir yönetimi de her geçen gün önemini arttırmıştır. Farklı tanımları olmakla birlikte “ambalaj atıkları üretim atıkları hariç, ürünlerin veya herhangi bir malzemenin tüketiciye yada nihai kullanıcıya ulaştırılması aşamasında ürünün sunumu için kullanılan ve ürünün kullanılmasından sonra oluşan kullanım ömrü dolmuş tekrar kullanılabilir ambalajlar da dahil çevreye atılan veya bırakılan malzeme olarak kağıt, plastik, metal, cam, ahşap ve kompozitten yapılan satış, ikincil ve nakliye ambalajı atıkları olarak tanımlanmaktadır” [1].

Türkiye’de ambalaj atığı yönetimi ile ilgili ilk çalışmalar 1991 yılında Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’nin Ek-1’inde 17 kalem gıda ve temizlik ürünü kaplarına depozito ve kota uygulanacak ürünler olarak belirlenmiştir. Bu ürünleri dolu olarak ithal edenlere belirli oranlarda geri toplama ve geri kazanma zorunluluğu getirilmiştir. Bu uygulama ambalaj atıklarının toplanması ve geri kazanılması konusunda yapılan çalışmaların temelini oluşturmuştur. Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’nde 2002 tarihinde değişiklik yapılarak yükümlülük verilen sanayi kuruluşları adına ambalaj atıklarını toplamak isteyen işletmelere Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından ön lisans ve lisans alma zorunluğu getirilmiştir. Avrupa Birliği uyum sürecinde 94/62 EC Ambalaj ve Ambalaj Atıkları Direktifi kapsamında Ambalaj ve Ambalaj Atıklarının Kontrolü yönetmeliği 30.07.2004 tarih ve 25538 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanarak 01.01.2005 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Bu yönetmeliğin yürürlüğe girmesi ile Katı Atıkların Kontrolü Yönetmeliği’nin ilgili maddeleri yürürlükten kaldırılmıştır. Ambalaj atıkları yönetmeliği 24.06.2007 de revize edilmiş, 24.08.2011 tarihinde ise tekrar revize edilip son halini almıştır.

Sürdürülebilir atık yönetiminde bertaraf yöntemlerinin çevresel, sosyal ve ekonomik boyutlarını hesaplamada yaşam döngüsü analizi önemli bir araçtır. Literatüre baktığımızda bu aracı kullanarak atık yönetimde optimum yönetim sistemi seçimini belirlemek için yapılmış çalışmalar bulunmaktadır [2,3,4,5,6,7,8]. Ferreira ve arkadaşları [9] Portekiz’de yerel bir yönetimin ambalaj atıkları için toplama, ayrıştırma, geri dönüşüm, depolama ve yakma proseslerini kullanarak, ambalaj atıklarının geri dönüşümü, depolanması ve yakılması durumundaki çevresel etkileri karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak, ayrıştırma ve geri dönüşümün, ambalaj atıklarının sadece yakılması veya depolanmasına göre daha olumlu çevresel etkileri olduğu YDA analizi ile matematiksel olarak kanıtlanmıştır. Chilton ve arkadaşları [10] atık pet şişelerin mekanik geri dönüşümü ile termal geri dönüşümünü karşılaştırarak mekanik geri dönüşümün çevresel boyutunun daha olumlu olduğunu hesaplamışlardır. Türkiye’de yapılan bir çalışma olarak Yıldız-Geyhan ve arkadaşları [11], yaşam döngüsü analizini İstanbul için çevreye duyarlı, optimum düzeyde kaynakta ayrılacak ambalaj atığı toplama sistemini belirlemek için kullanmışlardır. Aynı toplama sistemleri için yapılan 8 senaryo içerisinde 2 ve 3 lü ayrı toplama sistemi ile kaldırımdan toplamanın çevresel açıdan daha olumlu etkilere sahipken, daha fazla bileşene sahip ayrı toplama sistemlerinin çevresel etkilerinin daha az olduğunu hesaplamışlardır. Kentsel ve ambalaj atıkları yönetiminde yaşam döngüsü analizi ile Avrupa ve ABD gibi gelişmiş ülkelerde birçok çalışma olmasına rağmen, ülkemizde bu konuda eksiklikler bulunmaktadır. Bu eksikliği bir parça olsun gidermek için, bu çalışmada Sakarya-Serdivan ilçesi örnek yerleşim seçilerek oluşacak ambalaj atıklarının toplanması, ayrılması ve geri kazanılması sonucu oluşacak çevresel etkiler belirlenecektir. Mevcut ambalaj atıkları yönetimi ile olması hedeflenen yönetimin çevresel etkileri karşılaştırılacaktır. Sonuç olarak yaşam döngüsü analizi (YDA), yöneticiler ve karar vericiler için atıkların yönetimi esnasında oluşacak çevresel etkileri kontrol altına almak için nelere öncelik vermesini anlamaya ve yönetimi şekillendirmesine yardımcı olacaktır.

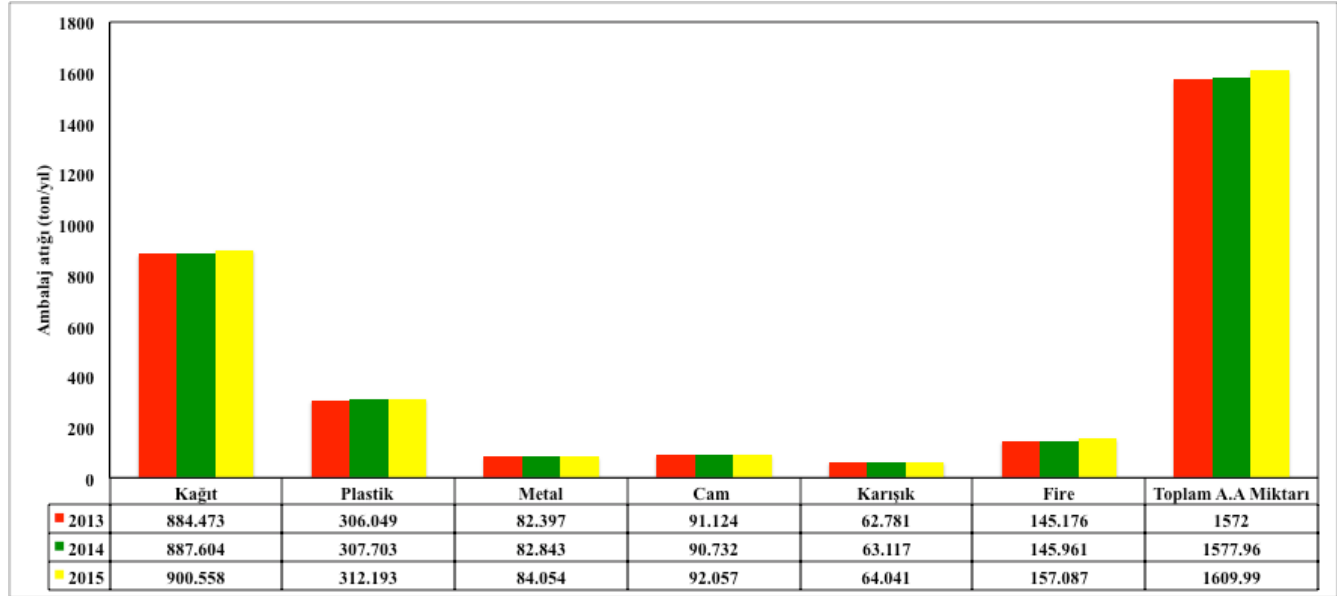


## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Amaç ve Kapsamın Belirlenmesi (Goal and Scope Definition)

Çalışmanın ana amacı ambalaj atıkları yönetiminin kaynaklar, insanlar ve ekosistem üzerine etkilerini yaşam döngüsü analizi yardımı ile incelemektir. Bu amacı gerçekleştirmek için ambalaj atıkları karakterizasyonuna sahip

Sakarya-Serdivan ilçesi örnek yerleşim yeri olarak seçilmiştir. Çalışmanın fonksiyonel birimi olarak Sakarya-Serdivan'da toplanan 1 ton ambalaj atığı ele alınmıştır. Şekil 1'de Serdivan ilçesine ait yıllara göre toplanan ambalaj atıklarının miktarı verilmiş olup, ambalaj atığının % 56,1 kağıt, %19,5 plastik %5,2 metal, %5,8 cam, %4,0 karışık ambalajdır [12]. Toplanan ambalaj atığındaki fire oranı ise %9,4 tür. Yıllar bazında ambalaj atığı bileşenleri yüzdelerinde ise büyük farklar yaratacak artış veya azalış bulunmamaktadır.



Şekil 1. Serdivan ilçesinde toplanan ambalaj atıklarının yıllara göre dağılımı (Distribution of packaging wastes collected in Serdivan district by years)

Sakarya-Serdivan ilçesinde çıkan atık miktarı, Serdivan ilçesi nüfus verileri [13] ve 2014 yılı kişi başı günlük atık üretiminin 1.08 kg olması [14] ve her sene %1 artışla artması ile 2015 yılı için 46146 ton ve 2016 yılı için 47970 ton olarak hesaplanmıştır. Sakarya iline ait genel atık kompozisyonu % 41 organik atıklar, % 10 yanabilen atıklar, % 32 geri kazanımı mümkün atıklar ve % 17 inorganik ve diğer atıklardan oluşmaktadır [15]. Ancak kaynağında ayrı toplama çalışmaları istenilen seviyeye gelmediğinden Serdivan ilçesinde çıkan atık miktarları ile toplanan ambalaj atıkları miktarı karşılaştırıldığında karışık atık içerisindeki geri dönüşebilir atık oranının %10 civarında olduğu hesaplanmakta olup, geriye kalan %22'lik kısım düzenli depolamada bertaraf edilmektedir.

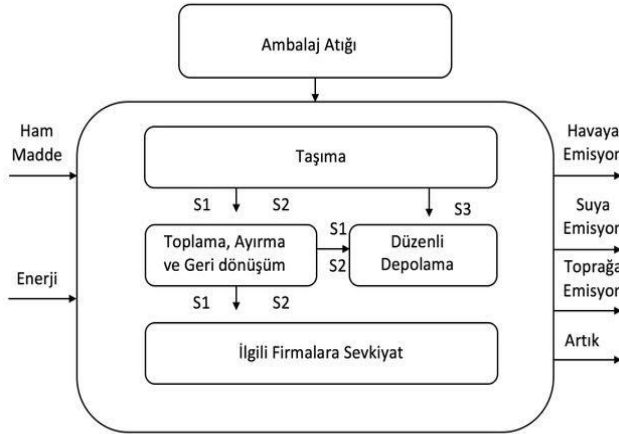
Çevresel etki değerlendirmesinin kapsamı ve bu kapsamı tanımlayan sistem sınırları ambalaj atığının toplanması, toplama-ayırma-geri dönüşüm tesisine ve/veya düzenli depolamaya nakliyesi, toplama-ayırma-geri dönüşüm tesisinde karışık ambalaj atıklarının ayrılması, kağıt, karton,

metalın preslenip geri dönüşüm firmalarına satılması, plastik atıkların kırılıp çapak haline getirilmesi, yıkanması, granül hale getirilmesi ve satılması, cam atıkların preslenmeden ilgili firmalara satılması, geri kalan artıkların veya geri dönüştürülemeyen malzemelerin düzenli depolamada bertarafıdır (Şekil 2). Bu çalışmada var olan yönetim sistemi ile olması gereken yönetim sistemleri için senaryolar oluşturulmuş ve bu senaryoların çevresel etkileri birbirleri ile karşılaştırılmıştır. Senaryolar aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Senaryo 1-(S1). Ambalaj atıklarının Sakarya-Serdivan verilerinden hesapla gerçek toplama-ayırma ve geri kazanım değerlerinde toplama-ayırma-geri dönüşüm tesisinde işlenmesi ve geri kalan atıkların Sakarya'nın mevcut düzenli depolama sahasına depolanması.

Senaryo 2-(S2). Ambalaj atıklarının yönetmelikte verilen hedefler doğrultusunda geri kazanımı ve geri kalan atıkların depolanması. Ambalaj atıkları yönetmeliğine göre bu hedef 2016 yılı için %52 dir [1].

Senaryo 3-(S3). Ambalaj atıklarının toplama ayırma-geri dönüşüm tesisleri tarafından toplanmayıp, karışık evsel atıkla Sakarya'nın mevcut düzenli depolama sahasında depolanması.



Şekil 2. Sistem sınırları (System boundaries)

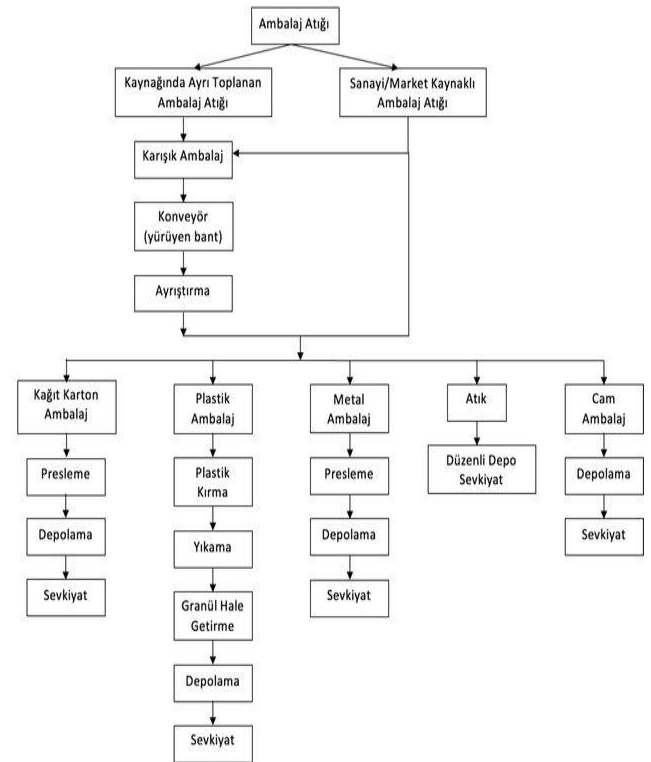
## 2.2. Veri toplama (Life Cycle Inventory)

Yaşam döngüsü analizinde envanter verileri, Sakarya-Serdivan ilçesinin ambalaj atıkları karakterizasyon çalışması, raporlar, literatür ve SimaPro 8.0.2 veritabanından toplanmıştır.

### 2.2.1 Atık Ayırma ve Geri Dönüşüm Tesisi (Material Sorting and Recovery Facility)

Sakarya'da bulunan toplama-ayırma ve geri dönüşüm tesisleri incelenerek örnek tesis akış şeması çıkarılmıştır. Serdivan ilçesinde ambalaj atığının % 61.4 'ü konutlardan % 38,6'sı sanayi ve marketlerden toplandığı için, örnek tesise girecek ambalaj atığı iki şekilde olacaktır (Şekil 3). İlki konutlardan kaynağında ayrı toplama çalışması sonucu toplanan karışık ambalaj atığıdır. Diğeri ise marketler ve sanayi kuruluşlarından alınan ayrı ayrı toplanan ambalaj atıklarıdır.

Toplanan ambalaj atıkları ilk olarak atık kabul alanına alınıp, kantarda tartıldıktan sonra atık ayırma alanında geri dönüşüm bandına gönderilip, türlerine göre kağıt, karton, plastik (PE, PP, PET, PS), cam, metal ve fire (çöp) olarak ayrıştırılır. Kağıt/karton ve metal ambalaj atıkları kendi arasında kalitesine göre ayrılıp, presleme işlemine tabi tutulur. Preslemenin ardından balya halinde stoklanan kağıt/karton ve metal atıkları daha sonra ilgili firmalara satılmak üzere sevkiyata gönderilir. Cam ambalaj atıkları ise geri dönüşüm bandında ayrıştırıldıktan sonra depolanır ve ilgili firmalara satılmak üzere sevkiyata gönderilir.



Şekil 3. Örnek tesis akım şeması (Example plant flow diagram)

Plastik atıklar, ayırma bandına alınıp işçi yardımı ile elle cinslerine ayrılır ve ardından parçalayıp, küçültmek için kırma makinesine gönderilir. Çapak PE, çapak PP, çapak PET ve çapak PS yıkama işlemine tutulduktan sonra agromel makinasında yoğunlaştırılarak granül hale getirilip, satılmak üzere depolanır. Plastiklerin geri dönüşümü esnasında atık hammadde işlenmemiş atığın tam olarak yerini alamayacağından % 28 madde kaybı olacaktır [16]. Toplama- ayırma tesisi için forklift, ayırma bandı ve pres-balyalama makinesi gerekirken, plastik geri dönüşümü için forklift, ayırma bandı, plastik kırma makinası, yıkamadan sonrası için sıkma makinası, agromel makinası ve plastik extruder (granül) makinası gerekmektedir. Toplama Ayırma ve Geri dönüşüm tesisinde proseslerden dolayı, elektrik, dizel ve su kullanımı söz konusudur. Banar'a [17] göre atık ayırma ve balyalama için elektrik tüketimi 0.059 kWh/ton iken Öztürk'e [18] göre kullanılan presin küçük veya büyük balya yapmasına göre motor gücü 7.5 kWh ile 150 kWh arasında değişmekte olup, ton atık başına elektrik tüketimi ortalama 3 kWh dir. Softa'nin yaptığı çalışma da [19] ise plastikleri ayırmada ihtiyaç duyulan enerji 0.02488 kWh/kg (24.88 kWh/ton) iken balyalamada kullanılan elektrik enerjisi 0.034 kWh/kg (34 kWh/ton) dir. McDougall ve arkadaşlarına [20] göre maddesel geri kazanım tesislerinde toplam yakıt ve elektrik tüketimi sırası ile 0.87 lt dizel/ton atık ve 22-27 kWh/ton atıktır.

Literatürde ortalama değerler çok değiştiğinden, bu çalışmada Türkiye koşullarına uygun olması açısından Sakarya'da bulunan tesislerden alınan gerçek değerler, ekipmanların satış katalogları ve

literatürden alınan değerler kullanılmış olup, Tablo 1 da özetlenmiştir.

Tablo 1. Tesiste kullanılan ekipmanların tükettiği hammadde ve enerji (Raw material and energy consumed by equipments)

Proses Adı	Kullanılan Ekipman	Tüketilen Kaynak ve Birimi	Referans
Taşıma	Forklift	2L/ton atık	[19]
Taşıma ve Ayırma	Konveyör Ayırma Bandı	0.37 kWh/ton atık	Tesis Bilgisi
Sıkıştırma ve Balyalama	Yatay Pres Makinesi	5 kWh/ton atık	[21]
Plastik Kırma	Plastik Kırma Makinesi (350 kg/saat)	62 kWh/ton atık	Tesis Bilgisi
Yıkama		1 m <sup>3</sup> su /ton atık	Tesis Bilgisi
Sudan Arındırma	Konik Sıkma Makinesi ALT-SM 250	150 kWh/ton atık	[22]
Ergitme	Agromel Makinesi NPK100 (200 kg/saat)	375 kWh/ton atık	[23]
Granül Hale Getirme	Granül Makinesi NSM110 (150 kg/saat)	430 kWh/ton atık	[24]

### 2.2.2. Düzenli Depolama (Landfilling)

Bu çalışmada, 1. ve 2. senaryolarda ambalaj atıklarının geri dönüştürülemeyen kısımları düzenli depoya gönderilirken, 3. senaryoda ambalaj atığı yönetimi yapılmayıp, hepsinin düzenli depoya gönderilmesi söz konusudur. Çalışmada seçilen örnek yer Sakarya olduğundan, gerçekçi olması için YDA envanterindeki depoların değerleri yerine Sakarya'daki düzenli depolamanın esas verileri baz alınmıştır [15]. 2015 yılında yapılan baca gazı analizi sonucu 19 bacadan sadece 2 baca % 30'un üzerinde metan (CH<sub>4</sub>)'e sahip olup, diğer bacalar düşük değerlerde kalmıştır [15]. 19 bacanın ortalaması üretilen biyogazın içeriğinin ton atık başına normalize edilmiş değerleri Tablo 2 de verilmiştir. Aynı şekilde 2015 yılı sızıntı suyu analiz sonuçlarının normalize değerleri Tablo 2 de verilmiştir.

### 2.2.3. Taşıma ve Elektrik (Transport and Energy)

Taşıma, karışık ambalaj atığın toplanması, toplama-ayırma-geri dönüşüm tesisi ile düzenli depolama sahasına taşınması sırasında karayolu ulaşım araçlarının kullanılmasından dolayı oluşan çevresel etkileri içermektedir. Bertaraf yöntemlerinin karşılaştırılmasında önemli farklılığa sebep olmaması için kurgulanan toplama-ayırma-geri dönüşüm tesisi ile düzenli depolama sahasının aynı yerde olmasına karar verilmiştir. Atık toplama bölgesi ile Sakarya'nın düzenli depolama sahası arasındaki ulaşım mesafesi yaklaşık 19 km'dir. Ayrıca ayırma bandında ayrılan ve balyalanan kağıt metal, cam gibi ambalaj atıkları ile granül hale getirilmiş

plastik ambalaj atıklarının geri dönüşüm firmalarına sevkiyatı sırasında taşıma söz konusudur. Bu kısımda da taşımadan dolayı farklılıklar oluşmaması için geri dönüşüm firmaları aynı mesafede olacak şekilde şehir seçilmiştir. Gebze'de ayrıştırılan tüm atık türlerini alacak firmalar olduğundan, bu çalışmada 120 km mesafedeki Gebze sevkiyat yapılacak şehir olarak seçilmiştir. Taşıma için SimaPro 8.0.2-Ecoinvent veri tabanında bulunan 'Nakliye, belediye atık toplama, kamyon 21t / CH S' seçilmiştir.

Tablo 2. Sakarya Düzenli Depolama Emisyonları (Emissions of landfill in the Sakarya)

Sızıntı suyu emisyonu		Gaz emisyonlar	
Kompozisyon	Birimi (g/ton)	Kompozisyon	Birimi (g/ton)
KOİ	231	CH <sub>4</sub>	24
BOİ	145	O <sub>2</sub>	49
TKN	0.56	CO <sub>2</sub>	44
TP	0.093	CO	0.00034
TCr	0.056	H <sub>2</sub>	0.00129
Cr <sup>+6</sup>	0.022	H <sub>2</sub> S	0.02061
Pb	0.026		
Fe <sup>+2</sup>	0.447		
Fe <sup>+3</sup>	0.00015		
Cu	0.037		
Zn	0.074		
pH (birimsiz)	7.4		

Elektrik kullanımı, toplama-ayırma-geri dönüşüm tesisi ile düzenli depolama sahasında kullanılan ekipmanların elektriği tüketmesinden kaynaklı çevresel etkileri içermektedir. Bu kısım için SimaPro 8.0.2'deki elektrik ülke karışımı altında Türkiye için orta gerilim kullanılmıştır. Verilere göre, Türkiye'deki elektrik karışımı % 32.6 kömür/linyit; % 46.0 doğal gaz; % 20.5 hidroelektrik enerji ve %1,5 yenilenebilir

enerjidir. Yenilenebilir enerji, jeotermal, rüzgar, biyokütle ve atıkları içermektedir.

### 2.3. Etkilerin Değerlendirilmesi (Life Cycle Assessment)

Bu çalışmada çevresel etkiler CML-IA hesaplama yöntemi ile hesaplanmış olup, yöntemin etki grupları abiyotik tükenme, abiyotik tükenme (fosil yakıtlar), küresel ısınma, ozon tabakası tahribatı, insan toksisitesi, tatlı su ekotoksitesite, deniz ekotoksitesite, karasal ekotoksitesite, fotokimyasal oksidasyon, asidifikasyon ve ötrofikasyondur.

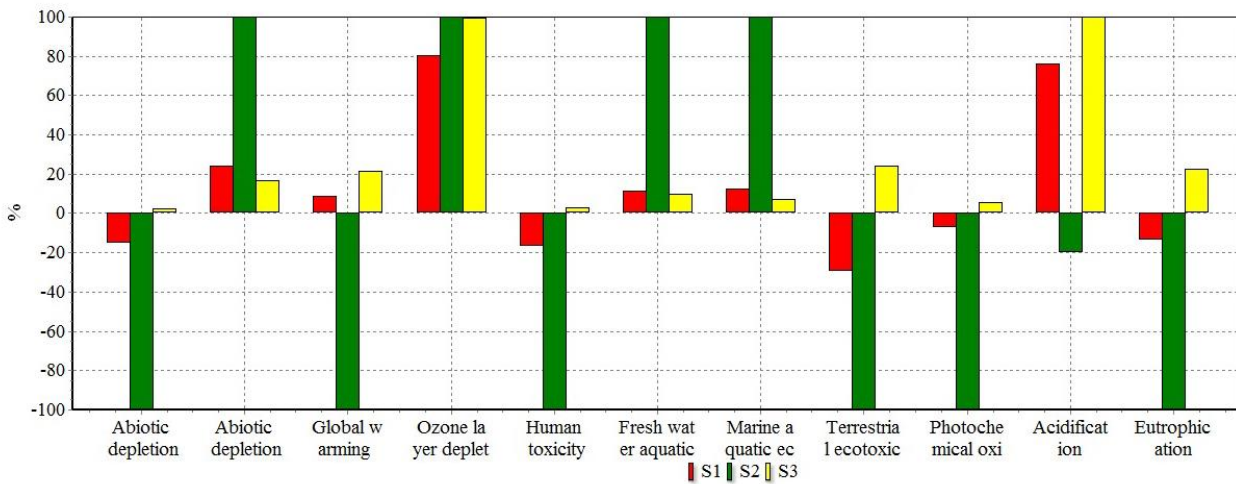
### 2.4. Yorum (Interpretation)

Bu kısım sonuçların güvenilirliğini ve hassasiyetini kontrol etmek için duyarlılık analizini içermekte

olup, etki değerlendirme yöntemi değiştirilerek gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada CML-IA yöntemi kullanılırken, duyarlılık analizi için IMPACT 2002 kullanılmıştır.

## 3. BULGULAR (RESULTS)

Ambalaj atıkları yönetimindeki senaryoların her etki kategorisi için YDA karakterizasyon analizinin sonuçları Şekil 4'de gösterilmiştir. Normalizasyon sonuçları da Tablo 3'de verilmiştir. Etki kategorilerine bakıldığında atıkların ayrılıp, toplanması ve geri dönüştürülmesi sonucu en az çevresel etki Senaryo 2'de gözlenmiştir.



Comparing 1 p 'S1', 1 p 'S2' and 1 p 'S3';  
Method: CML-IA baseline V3.01 / World 2000 / Characterization

Şekil 4. Yaşam döngüsü analizi karakterizasyon sonuçları (Life cycle characterization results)

Etki kategorileri küresel, bölgesel ve yerel etkiler olmak üzere üç gruba ayrılabilir. Küresel etkiler, küresel ısınma, insan toksisitesi, abiyotik tükenme; Bölgesel etkiler, asidifikasyon, insan toksisitesi, abiyotik tükenme; Yerel etkiler, asidifikasyon, ötrofikasyon, fotokimyasal oksidasyon, insan toksisitesi, tatlı su, deniz ve karasal ekotoksitesiteyi içermektedir. Her bir kategoriye ayrı olarak incelediğimizde, CLM-IA etki metodunda abiyotik tüketimin hem minerallere hem de fosil yakıtlara bağlı olduğunu görmekteyiz. İlk kategori mineral/maden rezervleri ile ilgili olup, minerallerin her bir çıkarımı için kg antimon eş değeri/ kg ekstraksiyonu olarak belirlenir [25]. İkincisi ise yenilemeyen fosil yakıtların kullanılması ile ilgilidir ve birimi MJ dur. İlk abiyotik tüketim etki kategorisi için ambalaj atıklarının (kağıt,

metal, cam) geri dönüşüme gönderilmesi ve plastiklerin geri dönüşümü olumlu etkilere sebep olmaktadır. Özellikle metallerin geri dönüşümü bu etki parametresinde önemli bir yere sahiptir. Diğer taraftan taşıma ve elektrik kullanımı nedeni ile fosil yakıtların kullanılması abiyotik tükenmedeki en büyük olumsuz etkidir. Senaryo 1 ve 2'de taşıma kaynaklı tüketimi ekipmanların kullandığı elektrik izlerken Senaryo 2'de elektrik kullanımı en büyük etkiyi vermekte olup yakıt kullanımı elektrik kullanımını takip etmektedir. Abiyotik tüketime bir bütün olarak baktığımızda elektrik tüketimi ve yakıt kullanımı olumsuz etkilere sebep olurken, metallerin ayrıştırılıp geri dönüşüme gönderilmesi ise olumlu etkilere sahiptir. 100 yıllık bir zaman aralığı için (GWP100) küresel ısınma potansiyeli kg karbondioksit/kg emisyonuyla ifade edilmektedir [25]. Küresel

ısınma etki kategorisi, atıkların depolanmasından kaynaklı biyogaz üretimi ve üretilen biyogazın doğrudan atmosfere salınmasından etkilenmektedir. Dolayısı ile depolamaya gidecek atık miktarı azaldıkça bu kategorideki olumsuz etkide azalmaktadır. Depolama ihtiyacının en az olduğu 2. senaryo çevresel açıdan en olumlu senaryodur. Ozon tabakasının incilmesi, ham petrol üretimi, petrol ve doğalgazın bir sonucu olan metan bromotrifloro halon 1301 den kaynaklanır. Bu etki kategorisi için en iyi senaryo 1'dir. Ulaşımında dizel tüketiminden salınan CO<sub>2</sub> emisyonu etkisi oldukça yüksektir. İnsan toksisitesi, insan faaliyetleri sonucu serbest bırakılan kimyasal bileşiklerin emisyonlarından kaynaklanabilecek olan çevre sorunudur ve 1.4 diklorobenzen eşdeğer/kg emisyon olarak ifade edilir. Toksikite salınımları kaynağı taşıma aşamasında oluşan emisyonlar ve toksik bileşenlere sahip atıklardır. Metallerin geri dönüşüme gönderilerek malzeme geri kazanımı bu etkiyi azaltan etmendir. Tatlı su, deniz ve karasal ekotoksositeye 3 senaryoda da uygulanan depolama yöntemi sırasında açığa çıkan nikel, berilyum, kobalt, vanadyum ve bakır gibi birincil kirleticiler neden olur. Ayrıca, elektrik kullanımından kaynaklı baryum, vanadyum gibi kirleticilerde bu etki kategorisine katkıda bulunurlar. Fotokimyasal oksidasyon etki göstergesi hidrojen (tamamen ikame edilmiş) ve çift bağlar (doymamış) içeren uçucu organik bileşikler (VOC) olarak fotokimyasal ozon oluşumuna katkıda bulunma potansiyeline sahip olan maddeleri tanımlar [26]. Depolama biyogaz emisyonuna bağlı olarak fotokimyasal oksidasyon üzerinde en olumsuz etkiye neden olur. Fotokimyasal oksidasyonu etkileyen emisyonlar eksik yanma ürünleri gibi tamamıyla indirgenememiş maddelerdir. Güneşin UV etkisi ile bu emisyonlar daha kalıcı ve toksik türevlere dönüşebilmektedir. Ulaşım ve dizel CO ve SO<sub>x</sub> serbest fotokimyasal oksidasyon etkisi yaratır. Elektrik kullanımı da bu etkiye olumsuz neden olmaktadır. Bir kirleticinin asidifikasyon potansiyeli H<sup>+</sup> iyon oluşturmasıyla ilgili olup kg SO<sub>2</sub> eşdeğeri başına üretilen H<sup>+</sup> iyonu sayısı olarak tanımlanan asidifikasyonda temel kirleticiler SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HCl ve NH<sub>3</sub>'tür. Enerji üretimi sırasında ve taşıma sırasında açığa çıkan SO<sub>2</sub> emisyonları ve NO<sub>x</sub> emisyonları asidifikasyona sebep olur. Düzenli depolanan atık miktarı fazla olan senaryolar en olumsuz çevresel etkiye sahiptir. Ötrofikasyon, atıklarda bulunan C, N, P gibi

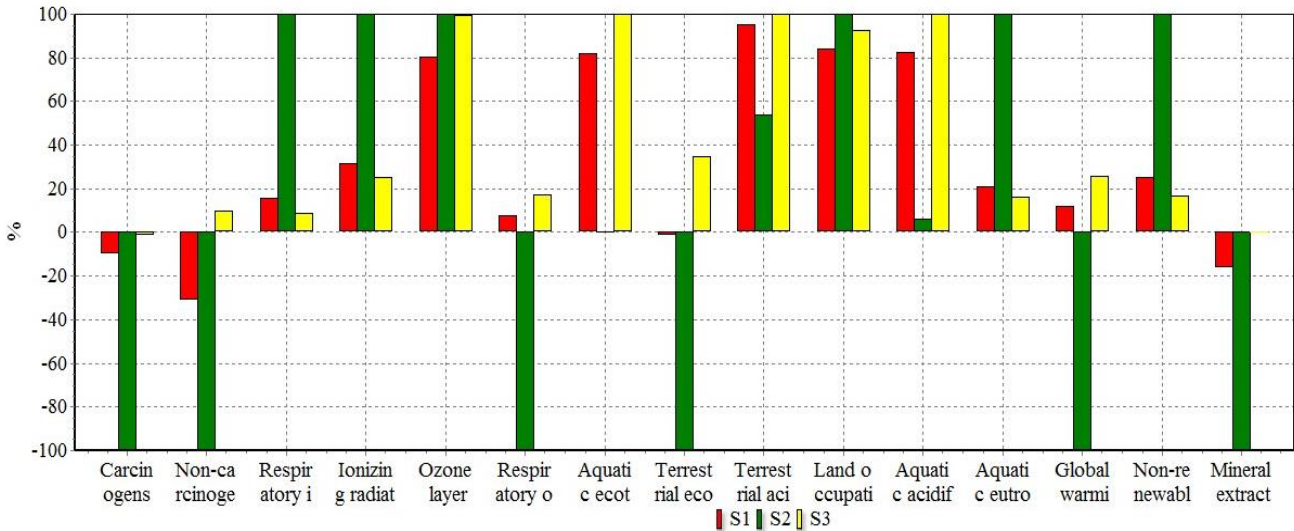
maddelerin yüzeysel sulara karışmasıdır. Hem karasal hem de sucul ortamı etkileyen bir olgudur. Ötrofikasyon potansiyeli genellikle PO<sub>3</sub>'ün eşdeğeri olarak ifade edilir. En yüksek ötrofikasyon etkisine, atıkların depolanması sırasında oluşan sızıntı sularından alıcı ortama taşınan besin maddeleridir.

Genellikle nakliye prosesinde yakıt tüketiminden kaynaklı NO<sub>x</sub> üretimi en büyük çevresel etkiye sahipken, buna karşın düzenli depolama işleminde havaya ve suya verilen emisyonların daha fazla çevresel öneme sahip olduğu söylenebilir (Özellikle metan için hava emisyonlarında, su emisyonlarında bakır gibi ağır metallerde). Elektrik tüketiminin etkisi, kaynakların tüketiminden kaynaklanmaktadır. Geri kazanımın olan senaryolardan görüldüğü gibi, geri kazanım çevresel etkileri azaltmaktadır. CML-IA yöntemi ile tüm senaryolar karşılaştırıldığında Senaryo 3'ün çevresel etkileri en olumsuz olup, ayırma-toplama ve geri kazanım oranı yüksek senaryonun çevresel etkileri azalttığı gözlenmektedir. Normalizasyon değerleri (Tablo 3) ambalaj atıklarının yönetim alternatifleri için, tatlı su ve deniz ekotoksitesi, ozon tabakası incilmesi ile fosil yakıt kaynaklı abiyotik tüketim en önemli etki kategorileri olduğunu belirtmiştir. Literatürdeki araştırmalarında teyit ettiği gibi [9] ambalaj atıklarının depolanması en kötü atık yönetimidir.

Şekil 5, farklı etki yöntemleri kullanarak yapılan duyarlılık analizi sonuçlarını göstermektedir. Şekilden görüldüğü gibi farklı etki değerlendirmeleri kullanılsa bile sonuçların çevresel etkiler kategorilerinde benzerlik göstererek, duyarlılık analizi sonuçlarımızın güvenilir olduğunu göstermiştir.

Tablo 3. Yaşam döngüsü analizi normalizasyon sonuçları (Life cycle normalization results)

Etki Kategorisi	Senaryo 1	Senaryo 2	Senaryo 3
Abiyotik tüketim	-4.94 E-13	-3.28 E-12	8.09 E-14
Abiyotik tüketim (fosil yakıtlar	1.86 E-12	7.70 E-12	1.29 E-12
Küresel ısınma	3.52 E-13	-4.01 E-12	8.68 E-13
Ozon tabakası incelmeye	6.49 E-15	8.07 E-15	8.04 E-15
İnsana toksisite	-1.63 E-11	-9.84 E-11	3.11 E-12
Tatlı su ekotoksitesitesi	3.72 E-12	3.28 E-11	3.18 E-12
Deniz ekotoksitesitesi	1.79 E-10	1.45 E-9	1.03 E-10
Karasal ekotoksitesite	-1.55 E-14	-5.29 E-14	1.29 E-14
Fotokimyasal oksidasyon	-1.94 E-13	-2.78 E-12	1.51 E-13
Asidifikasyon	4.52 E-13	-1.18 E-13	5.95 E-13
Ötrofikasyon	-2.98 E-13	-2.19 E-12	4.99 E-13



Comparing 1 p 'S1', 1 p 'S2' and 1 p 'S3';  
Method: IMPACT 2002+ V2.11 / IMPACT 2002+ / Characterization

Şekil 5. Duyarlılık analizi için farklı etki değerlendirmesinin karakterizasyon sonuçları (Characterization results of sensitivity analysis with different impact assessment methods)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Ambalaj atıklarının yönetiminde tercih edilen yöntem kaynağa ayrılması ve ayrı toplanmasıdır. Mutfak atıklarından ayrı olarak evlerden ve iş yerlerinden özel geri dönüşüm poşetlerinde, dış mekanlarda ise geri dönüşüm kumbaralarında biriktirilen ve toplanan kuru ve kirlenmemiş karışık ambalaj atıklarından yüksek kalitede geri dönüşüm elde edilir. Ancak kaynağında ayrı toplama çalışmaları henüz istenilen seviyeye gelmediğinden karışık atık içerisinde toplanıp, ayrıştırılan ve geri dönüştürülebilir oran %10 dur. Geri kalan kısım düzenli depoda bertaraf edilmektedir. Sakarya örneğinde olduğu gibi ülkemiz genelinde kaynağa toplamanın etkin olmaması, denetim ve izleme faaliyetlerinin eksikliği, belediyelerin sürece katılımının etkin olmaması, ekonomik araçların yeterli olmaması, bazı ambalaj türlerinin geri dönüşümünün alt yapısının olmaması dolayısıyla yönetilemeyen

ambalaj atıklarının sadece çevre sağlığı değil çevre sağlığı ile doğru orantılı olarak insan sağlığı üzerine de olumsuz etkileri bulunmaktadır. Örnek yerleşim yeri Serdivan ilçesinin ambalaj atıklarının depolanması için yapılan (Senaryo 3) yaşam döngüsü analizi sonuçları da ozon tabakası tahribatı ve sucul ortamlarda ekotoksik etkilerinin yüksek olması dolayısıyla ile insan sağlığı üzerine olumsuz etkilerin olduğunu göstermiştir. Geri kazanımın eklendiği Senaryo 1 ve 2 de ise geri kazanım oranının artması ile olumsuz çevresel etkilerin azaldığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, ambalaj atıklarının kaynağında ayrı toplanması esas olup, ayrı toplanmakta zorluk yaşıyorsa bu atıkların evsel atıklardan ayrılmasını sağlayacak ön ayırma tesislerinin belediye çöp depolama sahalarında kurulması ve işletilmesi tercih edilmelidir.

**TEŞEKKÜRLER (ACKNOWLEDGMENTS)**



Sakarya Büyükşehir ve Serdivan Belediyelerine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

**KAYNAKÇA (REFERENCES)**

- [1] *Ambalaj Atıklarının Kontrolü Yönetmeliği*, 28035, 24.08.2011.
- [2] P.N. Pressley, J.W. Levis, A. Damgaard, M.A. Barlaz and J.F. De Carolis, "Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment," *Waste Management*, vol.35, pp.307-317, 2015.
- [3] S. Nessi, L. Rigamonti and M. Grosso, "Packaging waste prevention activities: A life cycle assessment of the effects on a regional waste management system," *Waste Management and Research*. vol. 33 (9) pp. 833-849, 2015.
- [4] A.U. Zaman, "Life cycle environmental assessment of municipal solid waste to energy technologies," *Global Journal of Environmental Research*, vol 3(3), pp.154-163, 2009.
- [5] Q. Song, Z. Wang and J. Li, "Environmental performance of municipal solid waste strategies based on LCA method: a case study of Macau," *Journal of Cleaner Production*. vol.57, pp.92-100, 2013.
- [6] V. Koci and T. Trecakova, "Mixed municipal waste management in the Czech Republic from the point of view of the LCA method," *Int J Life Cycle Assess.* vol.16, pp.113-124, 2011.
- [7] H.H. Khoo, T.Z. Lim and R.B.H. Tan, "Food waste conversion options in Singapore: Environmental impacts based on an LCA perspective," *Science of the Total Environment*. vol.408, pp.1367-73, 2010.
- [8] S. Ferreira, M. Cabral, S. De Jaeger, N.F. Da Cruz, P. Simoes and R.C. Marques, "Life cycle assessment and valuation of packaging waste recycling system in Belgium," *J Mater Cycles Waste Manag*, vol. 19, pp.144-154, 2017.
- [9] S. Ferreira, M. Cabral, N.F. Da Cruz, P. Simoes and R.C. Marques, "Life cycle assessment of a packaging waste recycling system in Portugal," *Waste Management*, vol.34, pp.1725-1735, 2014.
- [10] T. Chilton, S. Burnley and S. Nesaratnam, "A life cycle assessment of the closed-loop recycling and thermal recovery of post-consumer PET," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 54, pp. 1241-1249, 2010.
- [11] E. Yıldız-Geyhan, G. Yılan-Çifti, G.A. Altun-Çiftçioğlu and M.A.N. Kadırgan, "Environmental analysis of different packaging waste collection systems for İstanbul-Turkey case study," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 107, pp.27-37, 2016.
- [12] T. Kise, B. Kuru, K. Demirer, B. Bağdatlı, E.B. Siper, T. Tunç, *Sakarya İli Ambalaj Atıkları Toplama, Ayırma ve Plastik Geri Dönüşüm Tesisi Tasarımı ve Maliyet Analizi*, Lisans Tezi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2016.
- [13] Türkiye İstatistik Kurumu (TUIK), Available: <http://www.tuik.gov.tr>.
- [14] Türkiye İstatistik Kurumu (TUIK), 2014 yılı için Belediye Atık İstatistikleri, No: 18777, Available: <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=18777>.
- [15] ÇED Raporu, Sakarya Büyükşehir Belediyesi, Entegre Katı Atık Bertaraf Tesisi ÇED Raporu, Duru Çevre Teknolojileri ve Lab. Hiz. Müh. Müş. İnş. Taah. San ve Tic. Ltd. Şti, Ankara 2015.
- [16] A.S. Erses Yay, "Application of life cycle assessment (LCA) for municipal solid waste management: a case study of Sakarya," *Journal of Cleaner Production*, vol.94, pp.284-293, 2015.
- [17] M. Banar, Z. Cokaygil and A. Ozkan, "Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey," *Waste Management*, vol.29, 54-62, 2009.
- [18] İ. Öztürk, Katı Atık Yönetimi ve AB Uyumlu Uygulamaları. İSTAÇ A.Ş. Teknik Kitaplar Serisi, İstanbul, Turkey, 2010.
- [19] A.N. Softa "Environmental and Economic Assessment of Management of Plastic Packaging Waste" M.S. thesis, Department of Environmental Engineering, DTU, Denmark, 2013.

- [20] F. Mcdougall, P.White, M. Franke, P. Hindle. Integrated solid waste management: a life cycle inventory. Blackwell Science, 2nd edition, pp. 544, 2003.
- [21] ASD Çevre Teknolojileri, Available: <http://www.asdcevre.com/default.asp?page=urunleric&kategoriID=26&urunID=103>
- [22] Altech Plastik Makine, Available: <http://www.altechmakina.com/en/productio n-products/130-plastic-compression.html>
- [23] Netplasmak Geridönüşüm Makineleri, Available: <http://www.netplasmak.com/tr/aglomer-makinas.html>
- [24] Netplasmak Geridönüşüm Makineleri, Available: <http://www.netplasmak.com/tr/plastik-granul-makinalari.html>
- [25] M. Goedkoop, M, Oele, S.Effting, Simapro Database Manual Methods Library. Pre constultants. Netharlands,2004.
- [26] M.Hauschild, H.Wenzel, Environmental Assessment of Products. Scientific Background. vol.2. Chapman &Hall. UK,1998.



	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 07.06.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 13.07.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.319658	

## Karabük sanayi bölgesi heyelanında güvenliğin sağlanması

Aşkın Özocak<sup>1</sup>, Sedat Sert<sup>2</sup>, Ertan Bol<sup>\*3</sup>

### ÖZ

Bu çalışma, Zopran Köyü/Karabük'te yer alan Organize Sanayi Bölgesi'nde gerçekleşen heyelanın araştırılması ile ortaya çıkmıştır. Gerçekleşen heyelanın şehrin trafo merkezi ve yüksek gerilim hattı ile sınır yapacak kadar yakın olması nedeniyle, acil çözümlerin ortaya konması gerekmiştir. Makalede heyelanın sebepleri tartışılmış ve önerilen çözümler sunulmuştur. Heyelan kitlesinin farklı zamanlarda iki kez hareket ettiği belirlenmiş olup heyelanın genişliğinin 80 m, boyunun ise yaklaşık 120 m civarında olduğu tespit edilmiştir. Ana aynanın yüksekliğinin 9-11 m olmasına karşın aynada mostra veren kayaya rastlanılmamıştır. Bunun yanında hareket eden kitle içinde diğer ikincil aynaların varlığı gözlemlenmiştir. Gözlemlenen zeminler, düşük plastisiteli kil bantları içeren çimentolanmamış gevşek siltli ve kumlu formasyonlardır. Arazi incelemesi sırasında heyelan eteklerinde su birikintilerinin görülmüş olması dolayısı ile bölgedeki doymun zeminlerin oldukça yumuşak oldukları anlaşılmıştır. Suyun kaynağı araştırıldığında, OSB alanı atık sularının uzun süredir beton borular kullanılarak transfer edildiği tespit edilmiştir. Bu durumda heyelan tetiklemek için gereken ana unsurun borulardan sızıntı yolu ile zeminin doymunluk derecesini arttıran bu atık su transferi olduğu ortaya çıkmıştır. Çalışma alanındaki zeminlerin doğal davranışını belirleyebilmek için örselenmiş ve örselenmemiş numuneler üzerinde fiziksel ve mekanik laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Limit denge yöntemlerini kullanan yazılımlar ile yapılan çözümlenmeler sonrasında, kazıklı duvar ve berm çözümünün güvenliği sağlamak için yeterli olduğu anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Heyelan, boşluk suyu basıncı, duraylılık analizi, kazıklı perde, kaya dolgu

## Ensuring the Safety of Karabük Industrial Zone Landslide

### ABSTRACT

This study is about the investigation of a landslide which occurred at the Organized Industrial Zone located in Zopran village / Karabük. Because the boundary of the landslide was immediately adjacent to the Transformer Substation and Overhead Power Line, urgent solutions were required. The reasons for the occurrence of landslide were discussed and the proposed solutions were also presented in this paper. The landslide was stated to move twice in different times. The width and length of the landslide were almost 80 m and 120 m, respectively. While the height of the main scarp was 9-11 m, rock outcrop was not observed at the main scarp. It was also observed that there were some other secondary scarps in the moving land. The soil consists of uncemented loose silty and sandy formations containing low plasticity clay bands. There were some small puddles and the saturated soil near the foothills was observed to be very soft. During the investigation of the source of the water, it was found out that the wastewater of Organized Industrial Zone was transferred by using concrete pipes for a long time. It was, hence, concluded that the main factor to trigger the landslide was the saturation of the soil because of the leakage from the pipes. Physical and mechanical laboratory tests were conducted on the undisturbed and disturbed soils to understand the nature of the soils in the study area. After the limit equilibrium analysis, it was shown that piled wall and berm solution is enough to have a safe design.

**Keywords:** Landslide, pore water pressure, stability analysis, piled wall, berm

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, aozocak@sakarya.edu.tr

<sup>2</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, sert@sakarya.edu.tr

<sup>3</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, ebol@sakarya.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yamaçların duraylılığının değerlendirilmesi inşaat mühendisliğinin önemli, ilginç ve zor sayılabilecek konularından biridir [1]. Bu çalışmada Karabük İli, Merkez İlçesi, Zopran Köyünde yer alan Karabük Trafo Merkezi alanının hemen yanında gerçekleşmiş olan heyelanın kontrol altına alınması ve tesisin güvenliğinin sağlanmasına yönelik çalışmaların yapılması ve önlemeye yönelik sonuçların ortaya konulması amaçlanmıştır. Heyelan alanına gidilerek gerçekleşmiş heyelanla ve mevcut trafo alanıyla ilgili saha gözlemleri yapılmıştır. Sahanın özellikleri ve heyelan eden kitle tüm doğrultulardan gözlemlenerek heyelanın geometrik özellikleri not edilmiştir. Daha sonra, arazide zemin özelliklerini belirleme amacıyla dönel sondaj gerçekleştirilmiştir. Sondajlardan gelen numuneler Sakarya Üniversitesi Geoteknik Laboratuvarında denenmiştir. Numuneler üzerinde zemin sınıflamalarına yönelik fiziksel deneyler ile zeminlerin kayma direncini belirlemeye yönelik mekanik deneyler yürütülmüştür. Mekanik deneyler vasıtası ile zemin parametreleri kullanılarak kazıklı perde destekli çözüm de yapabilen yazılımlar kullanılarak analizler yapılmış, güvenliğe yönelik çözümler üretilmiştir.

## 2. HEYELANIN ÖZELLİKLERİ (PROPERTIES OF THE LANDSLIDE)

İki farklı zamanda hareket ettiği söylenen zemin kitlesi yaklaşık olarak 100 metre genişlik ve 200 metre uzunluğa sahiptir. Hareket sonucunda açığa çıkan heyelan aynası yaklaşık 9-11 metre yüksekliğe sahiptir. Aynadan görüldüğü kadarıyla zemin kahverengi, düşük plastisiteli kil bantları içeren çimentolanmamış gevşek siltli ve kumlu birimlerden oluşmaktadır. Ayrıca, sağlam kayanın da mostra vermediği görülmüştür. Heyelan kitlesi içerisinde ayrıca tali aynalar da mevcuttur. Heyelan tacı, Trafo Merkezi dış duvarına en yakın yerinde 2 metre uzaklıkta başlamaktadır. Şekil 1'den görüleceği üzere heyelan tacının hemen üzerinde bulunan yüksek gerilim hattı direği taca çok yakın konumda bulunmakta ve taç arkasında oluşmaya başlayan çekme çatlakları direğin ayakları arasından geçmektedir.



Şekil 1. Heyelan aynasının görünümü

Söz konusu alanda yapılan incelemelerde heyelan eden kitlenin özellikle eteklerine yakın yerlerinde suya doygun zeminlerin balçık kıvama geldiği dikkati çekmiş ve fotoğraflanmıştır (Şekil 2). Bu bölgelerden alınan blok örneklerin bir kısmının laboratuvarında su içinde bekletildiğinde kolayca dağıldığı görülmüştür. Suyun geliş yeri araştırılmış ve heyelanın bulunduğu alana uzun zamandan beri OSB'nin atıksularının yer altından taşındığı büzlerden sızmalar ile su geldiği anlaşılmış ve fotoğraflanmıştır (Şekil 3). Kitle hareketlerinde güvenliği azaltan en önemli etkenler yerüstü ve yeraltı sularıdır [2] [3]. Bu olayda zemin özellikleri bakımından zaten kritik durumda olan yamaçtaki heyelanı tetikleyen en büyük faktör; söz konusu büzler vasıtasıyla yamaçta su seviyesinin yükseltilmesidir. Siltli ve ince kumlu zeminlerde kılcılık vasıtasıyla su hareketi statik su seviyesinin 8-10 metre üzerine kadar çıkabilmektedir. Geoteknik mühendisliğinde bu durum genel anlamda emme basıncı nedeniyle efektif gerilmeyi arttırıcı bir rol oynayıp genel stabilitenin lehine bir durum gibi gözükse de, gelen aşırı su hacmi nedeniyle sistem tamamen doygun hale gelerek yamaç üzerindeki yükü aşırı oranlarda arttırabilmektedir. Bu da yamacın dengesini olumsuz yönde etkileyecek olan sürücü kuvvetleri arttırmaktadır.



Şekil 2. Heyelan eteğinde görülen göllenmelere örnek



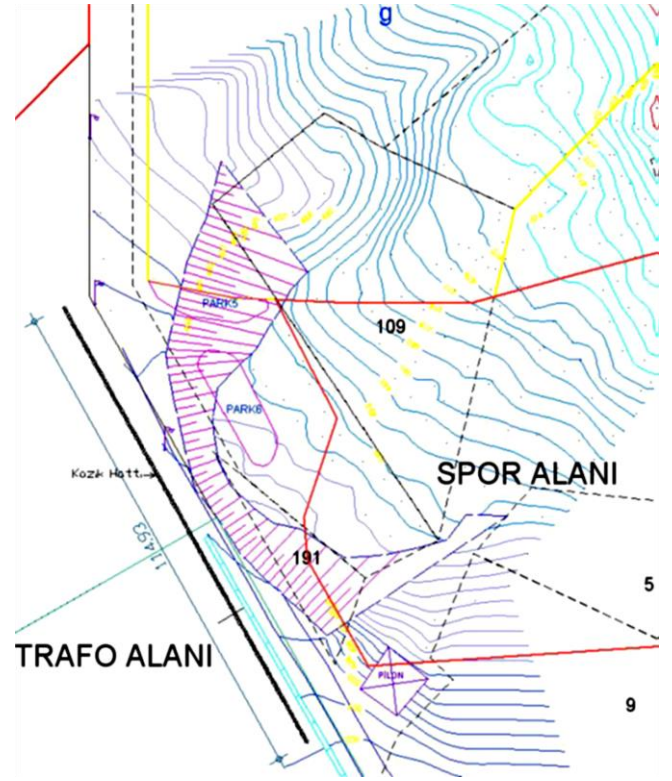
Şekil 3. OSB alanında görülen su kaçağı

### 3. ARAZİ ÇALIŞMALARI (IN-SITU WORKS)

Karabük heyelan alanında biri 30, diğeri 35 metre olmak üzere toplam uzunluğu 65 metre olan 2 adet dönel sondaj gerçekleştirilmiştir. Sondaj çalışmaları esnasında örülenmiş ve örülenmemiş numuneler alınmıştır. Arazi deneyi olarak her iki kuyuda 1.5 metrede bir standart penetrasyon deneyi yapılmıştır. Tablo 1’de yapılan SPT deneylerinin özeti verilmektedir. Ayrıca arazide heyelan sonrası topoğrafik ölçümlerin gerçekleştirilmesi sağlanmıştır (Şekil 4).

Tablo 1. SPT deneyinde darbe sayıları

Derinlik	SK-1	SK-2
1.50	19	17
4.50	19	18
7.50	22	22
10.50	23	25
13.50	29	26
21.50	32	27



Şekil 4. Trafo alanında heyelan sonrası topoğrafya

### 4. LABORATUVAR DENEYLERİ (LABORATORY TESTS)

Araziden gelen örülenmiş ve örülenmemiş numuneler laboratuvarda TS 1900/2006-1 ve 2 uyarınca deneye tabi tutulmuş ve zeminler TS 1500/2000’e göre sınıflandırılmıştır [4] [5] [6]. Laboratuvar deneylerinden elde edilen zemin indeks özellikleri Tablo 2’de, kesme kutusu deneyinden elde edilen kayma direnci parametreleri özeti ise Tablo 3’de toplu halde sunulmaktadır [7].

Tablo 2. Çalışma alanı zemin özellikleri

SK	z (m)	Renk	WL	WP	w <sub>n</sub>	IL	%İnce	Sınıf
1	1.5	Kahve	NP	NP	15	-	57	ML
1	3.0	Kahve	31	15	17	0.18	73	CL
2	4.5	Kahve	NP	NP	9	-	22	SM
1	6.0	Kahve	31	16	17	0.10	70	CL
1	7.5	Kahve	26	15	20	0.49	53	CL
2	9.0	Kahve	NP	NP	6	-	14	SM
2	10.5	Kahve	NP	NP	22	-	38	SM
2	12.0	Kahve	NP	NP	11	-	28	SM
1	13.5	Kahve	28	14	26	0.93	52	CL
2	15.0	Kahve	NP	NP	13	-	22	SM
2	16.5	Kahve	NP	NP	13	-	27	SM

Tablo 3. Çalışma alanı zeminlerinin kayma direnci parametreleri

SK	z (m)	e	ρ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	φ (°)	c <sub>r</sub> (kPa)	φ <sub>r</sub> (°)	P
1	3.0	0.49	21.25	31	25			185
1	6.0	0.63	20.73	12	25	22	17	275

2	9.0	0.9 5	15.30	0	3		
2	12.0	1.1 4	14.45	0	3		
2	15.0	0.8 5	16.16	1	2		
2	18.0	1.1 4	15.43	0	2	0	29
Blo k	No. 3	1.1 2	47.72	0	2	6	22
Blo k	No. 5	1.2 8	17.24	47	4	16	17

## 5. DURAYLILIK ANALİZLERİ (STABILITY ANALYSIS)

Alanda heyelan öncesi durumu gösteren topoğrafik harita mevcuttur. Heyelan sonrası ise mevcut durumu ortaya koymak için yeni topografya çıkartılmıştır. Bu araçlar ile heyelan öncesi ve sonrasını temsil eden kesitler oluşturulmuş ve kesitler kazıklı perde destekli çözüm de yapabilen bir bilgisayar yazılımına aktarılmıştır. Daha sonra laboratuvar sonuçları ve arazi verileri bir arada irdelenerek jeolojik birimlerin profilleri ortaya konmuştur. Buna göre üst dokuz metre, killi kum ve siltlerden oluşmaktadır. Killerin düşük plastisiteli olması ve siltlerin plastik olmaması (NP) yanında her ikisinin de iri dane içeriklerinin yüksek olması dikkat çekmektedir. Analiz sonuçlarının özeti Tablo 4'den izlenebilir. Heyelan gerçekleşmiş olduğu için heyelan öncesi doğal topografya üzerinde yapılan geri analiz ile kullanılan zemin parametreleri teyit edilmiştir (Analiz No: 1). Heyelan sonrası topografyanın kullanıldığı analizlerde, hareketin kısıtlı kalması nedeniyle doruk (peak) değerler ile kalıntı (residual) değerler arasında seçilmiş değerler kullanılmıştır. Buna göre heyelan sonrası 1.07 olarak bulunan (Analiz No: 2) güvenlik sayısı, deprem kuvveti uygulandığında ise aynı şevde 0.81'e düşmüştür (Analiz No: 3). Bu da hem statik hem de dinamik durumda mevcut kesitin çok kritik düzeyde olduğunu göstermektedir. Duraylılığı sağlamak amacıyla 0.80 metre çaplı, 20 metre boyunda teğet kazıklardan oluşan perde duvar analizlere dahil edilmiştir. Bu perde duvar ile yapılan depremlerli analiz sonucunda, güvenliğin kazıktan geçen kayma yüzeyi için bir sorun teşkil etmediği ancak kazık ile şev arasında kalan kısmın uzun vadede halen güvensiz olduğu anlaşılmıştır (Analiz No: 4). Bu olumsuzluğu gidermek için kesite eklenen nitelikli gereçten oluşan kaya dolgu (berm) sayesinde güvenlik sayısı statik durumda 1.51'e çıkmıştır (Analiz No: 5). Aynı kesit için yapılan depremlerli analizlerde hem kazıkları kesen kayma yüzeyi (1.43) hem de kazık önü kayma yüzeyi

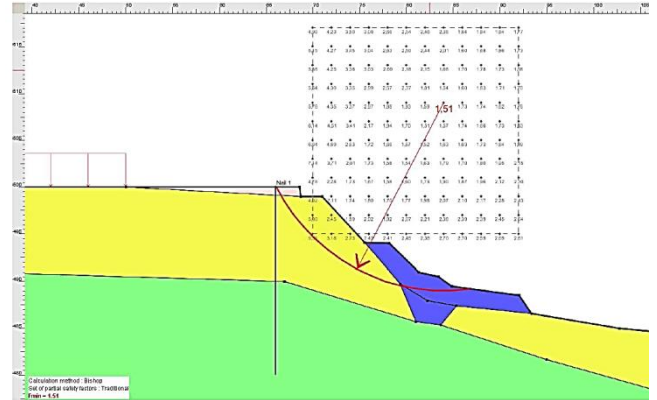
(1.08) için gerekli minimum güvenliğin sağlandığı görülmüştür (Analiz No: 6, Şekil 5).

Tablo 4. Duraylılık analizi sonuçları

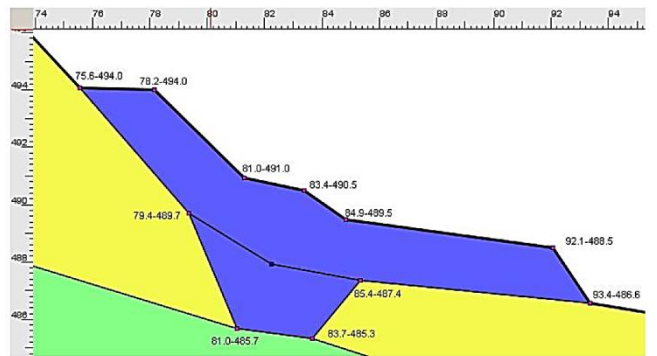
No	Topoğrafya	Deprem	Perde	Dolgu	GS
1	Heyelan öncesi	-	-	-	1.00
2	Heyelan sonrası	-	-	-	1.07
3	Heyelan sonrası	0.2 g	-	-	0.81
4	Heyelan sonrası	0.2 g	D=0.8m, L=20m	-	1.16- 0.84
5	Heyelan sonrası	-	D=0.8m, L=20m	Var	1.51
6	Heyelan sonrası	0.2 g	D=0.8m, L=20m	Var	1.43- 1.08

Not: Min GS veren kayma yüzeyi perde önünde

Kazıkların teşkil edilmesi ile genel güvenlik sağlansa da, kazık ile mevcut heyelan düzlemi arasında kalan kısmın güvenliğinin yine kritik düzeyde olduğu yapılan analizler sonucu ortaya çıkmıştır. Bu durumda mevcut şevin hemen önünde pasif direnci arttırmak amacıyla kaya dolgu (berm) kullanılması gerektiği analizlerde ortaya çıkmıştır. Mevcut şevin topuğunda teşkil edilecek kaya dolgunun kesiti Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil üzerinde dolgunun kırım noktalarının koordinatları metre cinsinden okunabilir.



Şekil 5. Analiz no.6 çözümü



Şekil 6. Önerilen kaya dolgu kesiti



## 6. ÖNERİLER VE SONUÇ (SUGGESTIONS AND CONCLUSION)

Bu çalışmada Karabük, Zopran'da bulunan trafo merkezi alanını çevreleyen duvarların hemen önünde gerçekleşen heyelanın kontrolüne ve güvenlik altına alınmasına yönelik olarak yapılanlar özetlenmiştir. Heyelan alanına aktarılmakta ve yamacı beslediği kesin olan atık su hattının ivedi söz konusu bölge dışına taşınması gerekmektedir. Tüm bunların yanında trafo alanına yeni tesis ve inşaat yapılmamalı, sürücü kuvvetler arttırılmamalıdır. Yamacın ve dolayısı ile tesisin uzun vadede güvenli hale getirilmesi için öncelikli olarak heyelan tacını kapsayacak biçimde delme kazıklı perde kullanılması önerilmektedir. Kazıkların teşkil edilmesi ile genel güvenlik sağlansa da, kazık ile mevcut heyelan düzlemi arasında kalan kısmın güvenliğinin yine kritik düzeyde olduğu yapılan analizler sonucu ortaya çıkmıştır. Bu durumda mevcut şevin hemen önünde pasif direnci arttırmak amacıyla kaya dolgu (berm) kullanılması gerekmektedir. Dolgunun kontrollü bir şekilde sıkıştırılarak kuru mevsimde yerleştirilmesi gerekmektedir.

**Not:** Bu çalışma "ISITES 2016-International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science" adlı konferansta sunulan çalışmalar arasından seçilmiş olan "Karabük Organize Sanayi Bölgesi Heyelanının İncelenmesi" adlı çalışmanın geliştirilmesi ile hazırlanmıştır.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] J. M. Duncan ve S. G. Wright, Zemin Şevlerinin Duraylılığı (Çeviri: Çeviren: Kamil Kayabalı), Ankara: Gazi Kitabevi, 2005.
- [2] A. Önalp ve E. Arel, Yamaç ve Şevlerin Duraylılığı, İstanbul: Birsan Yayınevi, 2007.
- [3] E. Bol, A. Özocak ve S. Sert, «Su Kaçaklarının Şev Stabilitesi Üzerindeki Etkileri,» 5. Geoteknik Sempozyumu, Çukurova Üniversitesi, 5-7 Aralık 2013, Adana, 2013.
- [4] TSE, TS1900-1. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini, Ankara: TSE, 2006.
- [5] TSE, TS1900-2. İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri- Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini, Ankara: TSE, 2006.
- [6] TSE, TS1500 İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması, Ankara: TSE, 2000.
- [7] A. Önalp, E. Bol, A. Özocak ve S. Sert, «Geoteknik Rapor: Karabük ili, Merkez İlçesi, Zopran Köyü, Organize Sanayi Bölgesi,» Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 2012.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 28.06.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 25.07.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.323821	

## Duvar akışlı bir partikül filtresindeki basınç kaybının deneysel ve nümerik incelenmesi

Yunus Özkan<sup>1</sup>, İbrahim Özsert<sup>2</sup>, İdris Cesur<sup>3</sup>, Vezir Ayhan<sup>\*4</sup>

### ÖZ

Dizel motorlarda yanmanın tam verimle gerçekleşmemesi sonucunda zararlı gazlar ve partikül madde çevreye atılmaktadır. Dizel motorlar fakir karışımda çalıştıklarından dolayı azot oksit ve partikül madde emisyonları fazladır. Dizel motorlarda, partikül madde emisyonlarını kontrol altına almak için partikül filtreleri kullanılmaktadır. Partikül filtresi, içerisinde egzoz gazlarının çapraz akış yapmasını sağlayarak katı ve sıvı partikül madde emisyonlarını biriktirmek için tasarlanmıştır. Bu çalışmada, dizel partikül filtresinin basınç kaybı kurulan deney düzeneği üzerinde ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda partikül filtresine ait geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısı hesaplanmıştır. Sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak basınç kaybı analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** partikül filtresi, basınç kaybı, partikül madde

### Experimental and numerical investigation of pressure loss in a wall flow particulate filter

### ABSTRACT

In diesel engines, harmful gases and particulate matter are released to environment, since combustion does not occur with full efficiency. Nitrogen oxide and particulate matter emissions are too high because of operation on a lean mixture in diesel engines. Particulate filters are used to control particulate matter emission in diesel engines. Particulate filters are designed to collect solid and liquid particulate matter emissions while exhaust gases to do cross flow. In this article, pressure through particulate filter measured on the set up test arrangement. Permeability and inertial loss coefficient are calculated after the measurement. Pressure drop analysis is carried out with a finite element program. Experimental and numerical results are compared in the study at last.

**Keywords:** particulate filter, pressure drop, particulate matter

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Yunus Özkan, Fen Bilimleri Enstitüsü, Otomotiv Mühendisliği, Sakarya

<sup>2</sup> İbrahim Özsert, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya

<sup>3</sup> İdris Cesur, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya

<sup>4</sup>Vezir Ayhan, Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği, Sakarya

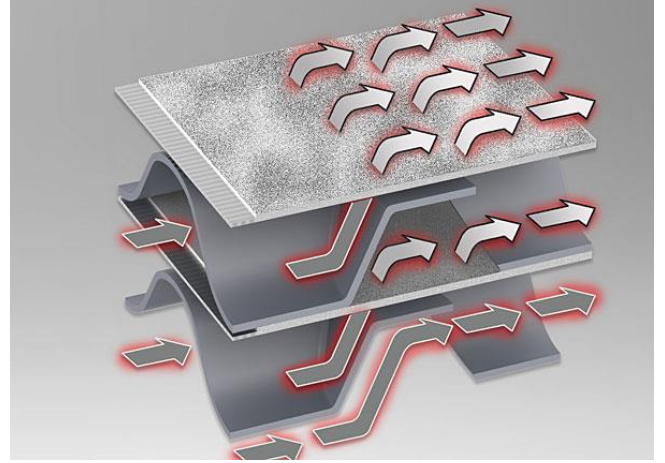
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dizel motorlar, verimlerinin yüksek ve yakıt sarfiyatlarının düşük olmasından dolayı günümüzde taşımacılıkta ve tarımda tercih edilmektedir [1]. Ancak, çalışma prensibinden dolayı, Otto motorlarına göre daha fazla çevre ve insan sağlığı açısından tehdit oluşturan NOx (azot oksit) ve PM (partikül madde) emisyonu yaymaktadırlar [2]. İdeal şartlarda yanmanın meydana gelmesi durumunda bu zararlı emisyonlar oluşmamaktadır. Fakat içten yanmalı motorlar hiçbir zaman ideal şartlarda çalışmadıkları için bu zararlı emisyonlar meydana gelmektedir.

Azot oksitler, yüksek sıcaklıklarda özellikle silindir içerisindeki sıcaklığın 1800 °C' yi geçtiği durumlarda, havanın içerisindeki azotun (N<sub>2</sub>) ve oksijenin (O<sub>2</sub>) birleşmesinden meydana gelmektedir. Partikül madde emisyonları ise, silindir içerisindeki yakıtın hava ile tam karışmaması veya yanma için yeterli zamanının olmaması durumunda, yanmanın tam olarak gerçekleşmemesinden oluşmaktadır [3]. Partikül madde emisyonlarının büyük çoğunluğu katı ve sıvı karbon (C) tanecikleridir.

Dizel motorlarından salınan partikül madde emisyonlarını kontrol altına almak için partikül filtreleri kullanılmaktadır. Partikül filtresi, yapısı gereği egzoz gazlarının geçişine izine verirken partikül madde emisyonlarını biriktirmektedir [4]. Yapısal olarak kısmi akışlı ve duvar akışlı olmak üzere iki şekilde üretilmektedirler [5].

Kısmi akışlı partikül filtreleri metalden imal edilmektedirler. Malzeme olarak alüminyum titanyum alaşımı kullanılmaktadır. Kısmi akışlı sistemlerde PM emisyonları mesh yapı içerisinde tutularak dışarı atılması engellenmektedir. Kanal sonları kapalı olmadığı için PM emisyonlarını % 60 oranında filtre edebilmektedirler [6]. Kısmi akışlı partikül filtresinin yapısı Şekil 1' de görülmektedir.

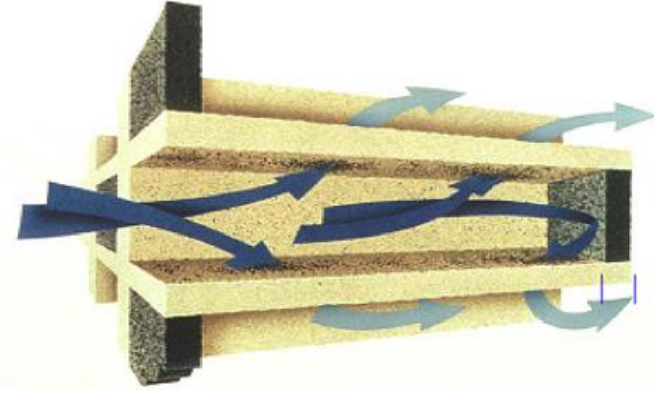


Şekil 1. Kısmi akışlı partikül filtresi (Partial flow particulate filter)

Duvar akışlı partikül filtrelerinin malzemesi ise, seramiktir. Silisyum karbid veya kordierit malzeme kullanılmaktadır. Silisyum karbid partikül filtreleri parçaları olarak imal edilebilmesi ve sıcaklığa dayanımının yüksek olmasından kordierit filtrelerden daha çok tercih edilmektedir [7]. Duvar akışlı sistemlerde, kanal sonları kapalı olduğu için PM emisyonları %90' ın üzerinde filtre edilebilmektedir [8]. Duvar akışlı partikül filtresi Şekil 2' de görülmektedir. Günümüzde devreye giren emisyon regülasyonlarının sağlanabilmesi için duvar akışlı partikül filtreleri tercih edilmektedir.

Partikül filtreleri PM emisyonlarının kontrol altına alınmasında çok etkili bir yöntem olmakla birlikte filtrenin yapısı ve içerisinde zamanla biriken partikül maddelerden dolayı egzoz gazlarının geri basıncını arttırmaktadır. Geri basıncın artması egzoz zamanı pompalama kayıplarını, silindir içi artık gaz kesrini ve volümetrik verimi olumsuz yönde etkilediğinden dolayı, motor performansını kötüleştirir. Bu nedenden dolayı, motor sonrasında bulunan partikül filtresi, oksidasyon katalizörü ve egzoz gibi sistemlerin oluşturmuş olduğu geri basıncın bilinmesi gerekmektedir.

Konstandopoulos ve arkadaşları, [9] yapmış olduğu çalışmada duvar akışlı partikül filtresinden kaynaklı basınç kaybının matematik modelini oluşturmuştur. Partikül filtresine ait yapısal, geometrik ve akış özelliklerine göre basınç kaybı hesaplanabilmektedir.



Şekil 2. Duvar akışlı partikül filtresi (Wall flow particulate filter)

Duvar akışlı partikül filtrelerinde, basınç kaybına ani daralma ve genişleme, kanal içerisindeki sürtünme, partikül madde birikmesi ve gözenekli malzeme içerisindeki akışın neden olduğunu belirtmiştir. Matematik model sonucunda, duvar akışlı partikül filtresindeki basınç kaybını aşağıda görülen Denklem 1 ile hesaplamıştır. Denklemde  $\mu$ ; akışkanın dinamik viskozitesini,  $Q$ ; hacimsel debiyi,  $V_{DPF}$ ; partikül filtresinin hacmini,  $a$ ; kanal genişliğini,  $w$ ; duvar genişliğini,  $L$ ; partikül filtre uzunluğunu,  $F$ ; sabiti (28,45),  $\beta$ ; Forchheimer katsayısını,  $\zeta$  ani daralma ve genişleme katsayısını ifade etmektedir.

$$\Delta P = \frac{\mu Q}{2V_{DPF}} (a + w)^2 \left( \frac{w}{ka} + \frac{8FL^2}{3a^4} \right) + \frac{\rho Q^2 (a+w)^4}{V_{DPF}^2 a^2} \left[ \frac{\beta w}{4} + 2\zeta \left( \frac{L}{a} \right)^2 \right] \quad (1)$$

Reddy, [10] yapmış oldukları çalışmada dizel partikül filtrelerinin, partikül madde emisyonlarını biriktirebilme kapasiteleri üzerinde çalışmışlardır. Temiz ve içerisinde partikül madde emisyonları biriken dizel partikül filtresinin akış analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Akış analizlerini sonlu elemanlar yazılımı olan Fluent ile yapmışlardır. Partikül filtresinin kanal geometrik özelliklerinin değiştirilerek en düşük basınç kaybı olan tasarımı bulmuşlardır. Kanal geometrisi olarak kare, üçgen ve dairesel kesitler seçilmişlerdir. Her bir kanal geometrisi için ayrı modelleme yapılarak analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda dairesel kanala sahip partikül filtresinin PM biriktirebilme ve basınç kaybı olarak en iyi sonucu verdiğini tespit etmişlerdir.

Di Huang [11] yapmış olduğu çalışmada, dizel partikül filtreleme özelliklerini ve kararsız çevrimde rejenerasyonu incelemiştir. Partikül

filtresi içerisinde biriken PM emisyonlarını iki şekilde modellemiştir. Bunlar dağınık ve toplu halde bulunan PM emisyonlarıdır. PM'lerin dağılmış olarak birikmesinin filtreleme açısından daha olumlu sonuç verdiğini bildirmiştir. Partikül filtresindeki basınç kaybına sebep olan beş önemli etkenin kanal boyunca değişen sıcaklık, biriken PM kalınlığı, PM'nin geçirgenliği, duvar kalınlığı ve duvar geçirgenliği olduğunu belirtmiştir. Toplanmış halde biriken PM'lerin rejenerasyonu için dışarıdan enerji gereksinimine ihtiyaç duyduğunu açıklamıştır. Rejenerasyon işleminin, en verimli şekilde gerçekleşebilmesi için araç yüksek hızda iken sıcaklığın 710 K'ne gelmesi ve 120 saniye boyunca bu koşullarda kalması gerektiğini bildirmiştir.

Masoudi, [12] parçalardan oluşan partikül filtresinin basınç kaybının matematik modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Dizel partikül filtrelerinin tek parça halinde imal edilmesinin zor olduğunu ve bu sebeplerden dolayı belirli kesitte parçaların üretilmesinin daha uygun olduğunu söylemişlerdir. Bu parçaları kullanarak istenilen çapta partikül filtresinin üretiminin daha kolay ve maliyeti azaltacağını belirtmişlerdir. Bu sebepten dolayı, parçalardan oluşan partikül filtresine ait basınç düşümünün matematik modelini geliştirmişlerdir.

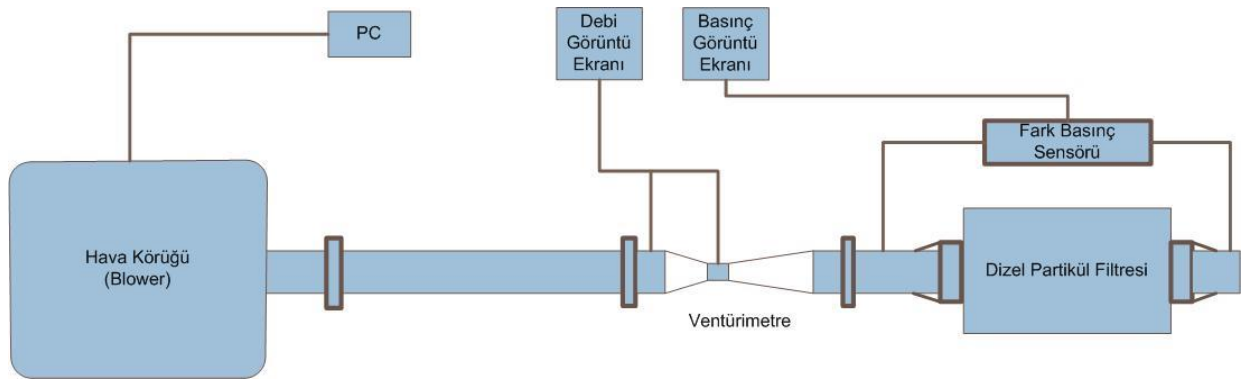
Lavicka ve arkadaşı [13] dizel partikül filtresinde düzensiz PM birikmesinden kaynaklı olan basınç kayıplarını incelemişlerdir. Bunun için temiz, merkez bölgesi PM biriken ve birikmeyen, bazı bölgelerde daha yoğun PM biriktiği varsayımı yaparak nümerik çözümler gerçekleştirmişlerdir. Bunun için sonlu elemanlar yazılımı olan Fluent'ten yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda partikül madde birikmesinin, egzoz gazının hızını düşürmekte olduğunu ve filtrelemeyi olumsuz yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Bu çalışmada, duvar akışlı partikül filtresinin kurulan deney düzeneği üzerinde basınç kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda ilgili debi değerine karşılık gelen basınç kayıpları saptanmıştır. Denklem 1' de debi ve basınç kaybı değerleri yerine yazılarak, geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısı hesaplanmıştır. Denklem çözülebilmesi için denklem lineer hale getirilmiştir. Daha sonra duvar akışlı partikül filtresinin 3B modelleri oluşturulmuştur. Sonlu



elemanlar yazılımı olan ANSYS-CFX kullanılarak partikül filtresinin akış analizi gerçekleştirilmiştir. Akış analizi sonucunda nümerik olarak basınç kaybı hesaplanmış ve deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Düzy düzeneğinde hava körüğü yardımıyla akış üretilmektedir. Üretilen akışın debisi venturi metre, basınç kaybı ise fark basınç sensörü ile ölçülmüştür. Ölçümde kullanılan ekipmanlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3. Deneysel düzeneği (Test arrangement)

a. Statik basınç ölçülmesinde 0- 1 bar arası %1 hassasiyetle ölçüm yapabilen Techis Marka 3296.069.001 model basınç transmitteri kullanılmıştır. Transmitter den alınan 4-20 mA sinyal işlenerek dijital ekrana yansıtılmıştır.

b. Sistemde hava temini için motora bağlı bir hava körüğü bulunmakta ve bu hava körüğü bir AC frekans dönüştürücü yardımıyla kontrol edilmektedir. Maksimum 2000 m<sup>3</sup>/h debi sağlayabilmektedir.

c. Partikül filtresindeki basınç kaybını ölçebilmek için Senseta marka, 1MPP2-2 model fark basınç sensörü kullanılmıştır.

Venturimetreden geçen hava debisi TS EN ISO 5167-4 standartından yararlanılarak hesaplanmıştır. İlgili standartta hava debisinin hesaplanması Denklem 2 ile yapılmaktadır.

$$q_m = \frac{H}{\sqrt{1-\gamma^4}} \varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta p \rho} \quad (2)$$

Denklem 2' de H; boşaltım katsayısını,  $\gamma$ ; venturi metrenin daralan kısım ve girişteki çapın oranını, d; daralan kısımdaki çapı,  $\Delta P$ ; venturi metredeki basınç farkını,  $\rho$ ; venturi metreden geçen

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Partikül filtresinin yapısal özellikleri olan geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısının hesaplanabilmesi için deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneği Şekil 3' de verilmiştir. Partikül filtresi uygun adaptör yardımıyla deney düzeneğine bağlanmıştır. İçerisine ortam sıcaklığında (25<sup>0</sup>C) hava gönderilerek basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilmiştir.

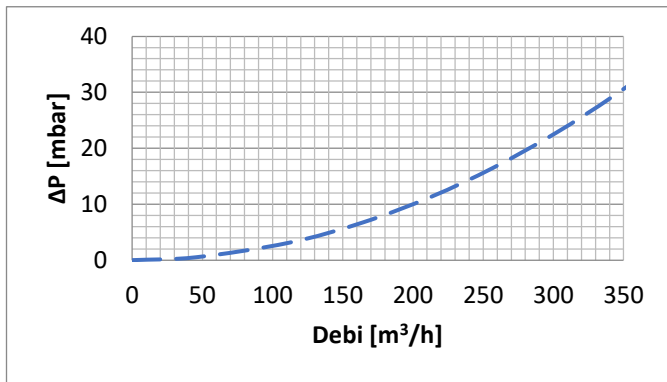
akışkanın yoğunluğunu,  $\varepsilon$ ; genişletirlik faktörünü ifade etmektedir. Ölçüm düzeneğinde elde edilen kütleli debi, hacimsel debiye çevrilmiştir.

Ölçümlerde fark basınç sensörü konumlandırılırken, ölçüm uçları partikül filtresinin giriş ve çıkışında kanal genişliğinin en az 100 katı olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bunun sebebi akışkandaki düzensizliklerin ölçüm değerine etkisini azaltmak içindir. Şekil 4' de deney düzeneği üzerinde ölçümü gerçekleştirilen partikül filtresi gösterilmiştir.

Basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilirken, havanın debisi hava körüğünden kademeli olarak artırılmış ve debi değerlerine gelen basınç kayıpları not edilmiştir. Şekil 5' de partikül filtresinin basınç kaybına ait grafik verilmiştir.



Şekil 4. Partikül filtresinin test edilmesi (Testing of the particulate filter)



Şekil 5. A partikül filtresi basınç kaybı ölçüm sonucu (Testing result of the A particulate filter)

Basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilen partikül filtresinin özellikleri Tablo 1' de verilmiştir. Basınç kaybı denkleminde ilgili değerler yerine konularak geçirgenlik ve içsel kayıp katsayısı hesaplanabilir.

Tablo 1 Partikül filtresi özellikleri

Çap (mm)	Uzunluk (mm)	CPSI	Kanal genişliği (mm)	Duvar genişliği (mm)	Porozite
Ø118	205	150	0,5	1,6	0,43

Fakat Denklem 1' in çözümü için Denklem 2 ve 3 teki gibi lineer hale getirilmesi gerekmektedir. Debi ve basınç kaybı değerleri bilindiğinden lineer hale getirmek için bu değerler yalnız bırakılır. Deney düzeneği üzerinde alınan noktalar için çözüm gerçekleştirilirse katsayılar hesaplanacaktır.

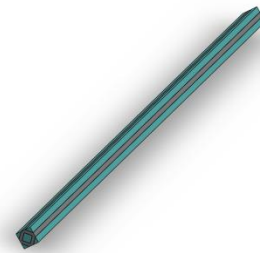
$$\Delta P = AQ + BQ^2 \quad (3)$$

$$\frac{\Delta P}{Q} = A + BQ \quad (4)$$

Çalışmada yapılan hesaplamalar sonucunda partikül filtresinin geçirgenlik değeri  $2,72 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ , içsel kayıp katsayısı ise 3,11 olarak bulunmuştur.

### 3. PARTİKÜL FİLTRENİN MODELLENMESİ (MODELLING OF THE PARTICULATE FILTER)

Akış analizi için partikül filtresinin tamamının modellenmesi çözüm için oldukça uzun bir süre gerektirmektedir. Çalışmada partikül filtresinin simetrisinden yararlanılarak tamamı değil, bir alan seçilerek modelleme gerçekleştirilmiştir. Bu alanın belirlenmesinde, partikül filtresinde basınç kaybına sebep olacak olan tüm etkilerin meydana geleceği kısım dikkate alınmıştır. Şekil 6' da bu alanın 3B görseli verilmiştir. Egzoz gazları partikül filtresi içerisinden atmosfere atılırken, kendisine komşu kanalları kullanmaktadır. CFD analizleri gerçekleştirilirken, çıkış kanalı için kendisine komşu tüm kanallar seçilmiştir. Partikül filtresinin akış analizleri 3B olarak gerçekleştirilmiştir.

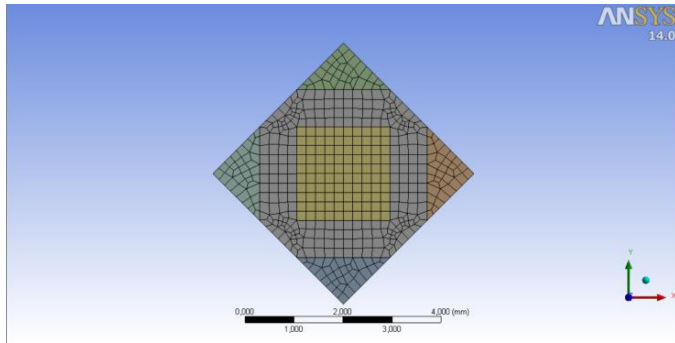


Şekil 6. A partikül filtresi (CFD domain)

Literatürde yapılan çalışmada [14] partikül filtresinde basınç kaybına sebep olan ani genişleme ve daralma etkisinin çok az olduğu görülmüştür. Bu sebeple ani daralma ve genişlemeden kaynaklı basınç kaybı ihmal edilmiştir. Deney düzeneği üzerinde ölçümü gerçekleştirilen partikül filtresinin içerisinde partikül madde birikmemiştir. Akış analizleri gerçekleştirilirken de içerisinde partikül madde birikmediği varsayımı yapılmıştır.

### 3.1. Mesh (Mesh Structure)

Ağ örgüsü oluşturulurken hexamesh eleman yapısı kullanılmıştır. Hexamesh eleman kullanılmasının sebebi, katı modeli oluşturulan partikül filtresinin akış analiz sonuçlarını değiştirmeyecek şekilde parçalara ayırmasıdır. Deneysel olarak basınç kayıpları gerçekleştirilen partikül filtresinin birim alandaki kanal sayısı 150' dir. Kanal genişliği ise 1.6 mm dir. Parçanın ağ örgüsü yapısı oluşturulurken en küçük eleman olarak 0.16 mm tanımlanmıştır. Şekil 7' de analizde gerçekleştirilen mesh yapısı gösterilmiştir.



Şekil 7. Partikül filtresi mesh yapısı (Mesh structure of particulate filter)

### 4. AKIŞ ANALİZİ (FLOW ANALYSIS)

Partikül filtresi ağ örgüsü oluşturulduktan sonra sınır şartları ve yapısal özelliklerinin atanması gerekmektedir. Partikül filtresinden giriş ve çıkış kanallarına akışkana ait özellikler atanmıştır. Gözenekli malzeme (partikül filtresi malzemesi) içinse geçirgenlik ve içsel kayıp katsayıları tanımlanmıştır. Akışkan, partikül filtresi içerisinde laminar akış gerçekleştirdiği için çözüm modeli olarak laminar akış seçilmiştir. Gözenekli malzeme ve giriş ve çıkış kanallarının birleştiği noktalar birleşme noktaları olarak tanımlanmıştır [15].

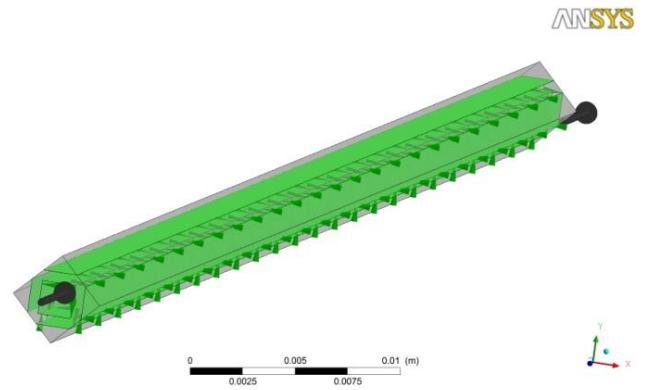
Partikül filtresinin deneysel olarak elde edilen basınç kaybı ölçüm sonucu Şekil 5' de görülmektedir. Bu grafikten partikül filtreden geçen debi değerine karşılık kanal içerisinden geçen akışkanın hız hesaplaması yapılmıştır.

Hız hesaplaması yapılırken deney düzeneği üzerinde venturi metre ile ölçülen basınç fark değerleri değerler alınmıştır. Akış analizleri

deneysel ölçümler sonucunda elde edilen 6 noktadaki hız değerleri için ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilere bağlı olarak tespit edilen hız değerleri Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2 Partikül filtresi hız değerleri (Velocity values of particulate filter)

Debi [m <sup>3</sup> /h]	Hız [m/s]
95,89	8,39
141,14	12,35
183,61	16,06
221,44	19,38
259,66	22,72
295,54	25,86

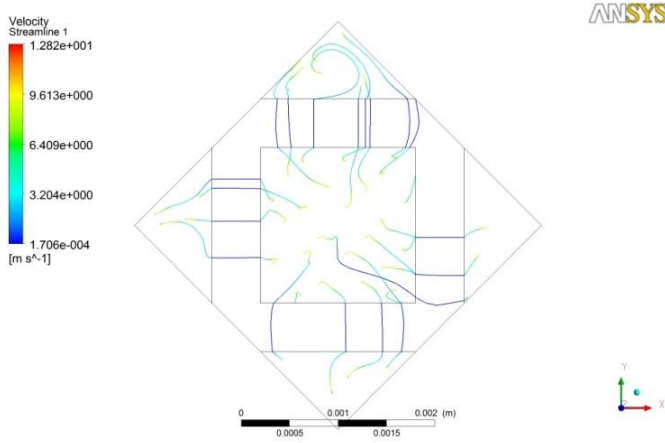


Şekil 8. Akışkan ve gözenekli malzeme birleşim yüzeyleri (Contact surfaces between porous and fluid)

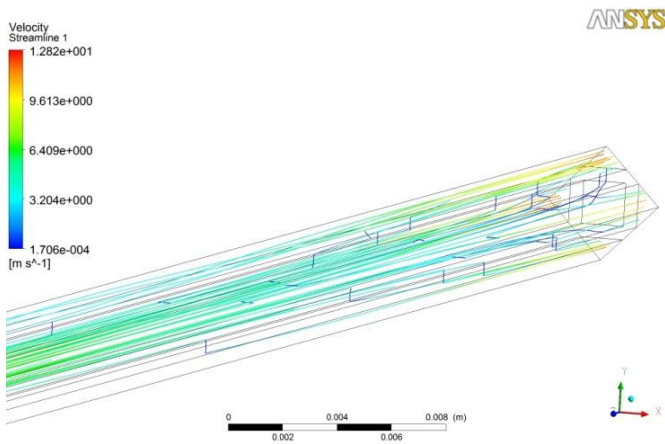
Akış analizleri sonucunda partikül filtresine ait basınç kaybı hesabı yapılırken giriş ve çıkış arasındaki basınç farkı alınmıştır. CFX modülünde basınç farkı denklem 5 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{massFlowAve(TotalPressure)}@In - \text{massFlowAve(Total Pressure)}@Out \quad (5)$$

Partikül filtresine ait gerçekleştirilen akış analizi sonucunda elde edilen hız çizgileri Şekil 9 ve 10' da verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi partikül filtresi içerisinde akış giriş kanalı içerisinde hareket etmekte ve kanal sonunda bulunan duvara çarpmaktadır. Bu durumda hız kanal sonunda 0 m/s olmaktadır. Akış gözenekli malzeme içerisinden hareket ederken hızı düşmekte ve laminar akış oluşmaktadır. Bu da modelin doğruluğunu göstermektedir.



Şekil 9. Hız çizgileri, ön görünüş (Velocity streamlines, front view)

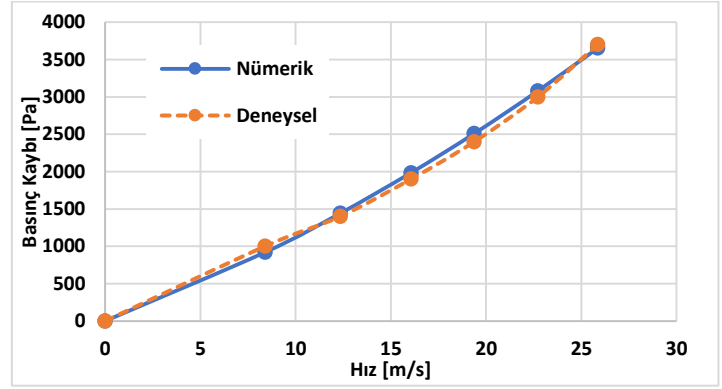


Şekil 10. Hız çizgileri, izometrik görünüş (Velocity streamlines, isometric view)

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Partikül filtresine ait nümerik ve deneysel olarak elde edilen basınç kayıpları Şekil 11’ de verilmiştir.

Şekil 11’den de görüldüğü gibi, nümerik ve deneysel olarak elde edilen sonuçların birbirine yakın değerler verildiği tespit edilmiştir. Deneysel ve analiz sonuçları arasında %4 hata payı olduğu görülmüştür. Akış analizinde, laminar akış seçilmesi düşük hızlarda daha yakın sonuç vermiştir. Hızın artmasıyla birlikte türbülanslı akışa geçildiğinden bozulmalar başlayacaktır. Bu nedenden dolayı analizler düşük hızlardaki akış için gerçekleştirilmiştir.





Şekil 11. Deneysel ve nümerik basınç kaybı sonuçları (Experimental and numerical pressure drop results)

Matematik modelde ani daralma ve genişlemeden kaynaklı basınç kaybının etkisi vardı. Basınç kaybı ölçümü gerçekleştirilirken hava, test düzeneğinde boru çapından kanal kesit alanına daralmakta ve çıkışta ise ani genişlemenin etkisi ile atmosfere atılmaktadır. Akış analizleri gerçekleştirilirken ani daralma ve genişlemeden basınç kaybının etkisi ihmal edilmişti. Deneysel ve nümerik sonuçlar karşılaştırıldığında, ani daralma ve genişlemeden kaynaklı basınç kaybının çok düşük olduğu görülmüştür. Bu da ölçüm sonuçlarını değiştirmemektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] E.Özcan, “Faz III B Emisyon standartlarına cevap veren turbo dizel traktör motorunun 4 supaplı silindir kafasının tasarımı ile ilgili teorik incelemeler ve uygulamalar,” *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, PhD Thesis , 2009.
- [2] V. Ayhan, “Bir dizel motoruna buhar enjeksiyonunun NOx ve is emisyonlarına etkisinin araştırılması,” *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi*, Doktora Tezi, 2009.
- [3] C. Soruşbay, “Egzoz gazları emisyonu ders notları,” *İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği*, 2015.
- [4] A. Keskin, S. Sağıroğlu, “Dizel motorlarından partikül madde emisyon kontrolü ve gelişmeler,” *5. Uluslararası Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, 2009.
- [5] G. Gaiser, P. Mucha, “Prediction of pressure drop in diesel particulate filters considering ash deposit and partial regenerations,” *SAE Technical Paper*, 2004.

- [6] R.L. Bloom, N.R. Brunner, S.C. Schroeer, “Fiber wound diesel particulate filter durability experience with metal based additives,” *SAE Technical Paper*, 1997.
- [7] A.Keskin, S.Sağiroğlu, “Dizel motorlarından kaynaklanan egzoz emisyonları ve kontrol yöntemleri,” *Mühendis ve Makina*, Cilt 51 (606), 2010.
- [8] A.G.Konstandopoulos, J.H.Johnson, “Wall-flow diesel particulate filters and their pressure drop and collection efficiency,” *SAE Technical Paper*, 1989.
- [9] A. Konstandopoulos, G. Athanasio, “Flow resistance descriptors for diesel particulate filters: Definitions, measurements and testing,” *SAE paper*, 2003-01: 0846, 2003.
- [10] Y.R.Reddy, “Design optimization of diesel particulate filter using CFD,” *International Journal of engineering Research and Applications*, 1.5: 119-128, 2015.
- [11] D.Huang, “Modeling of diesel particulate filter filtration and regeneration for transient driving schedules,” *Michigan Teknoloji Üniversitesi, Doktora Tezi*, 2011.
- [12] M.Masoudi, “Pressure drop of segmented diesel particulate filters,” *SAE Technical Paper*, 01-0971, 2005.
- [13] D.Lavicka, J.Knourek, “Numerical simulation with particle deposition on channel walls in the DPF filter,” *Experimental Fluid Mechanics*, 344-353, 2010.
- [14] A.G.Konstandopoulos, “Fundamental studies of diesel particulate filters: transient loading, regeneration and aging,” *SAE paper*, 2000-01: 1016, 2000.
- [15] Y.Özkan, İ.Özsert, V.Ayhan, İ.Cesur, “Reaktif tip susturucunun iç tasarımının akış ve akustik özelliklerine etkisinin incelenmesi,” *SAÜ Fen Bil Der* 20. Cilt, 1. Sayı, s. 65-74, 2016.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	Geliş/Received 03.05.2017 Kabul/Accepted 14.08.2017	Doi 10.16984/saufenbilder.310267	

## Performance comparison of different clustering methods for manufacturing cell formation

Sinem Büyüksaatçı Kiriş<sup>\*1</sup>, Fatih Tüysüz<sup>2</sup>

### ABSTRACT

This study refers to cell formation, which is the fundamental and important stage of cellular manufacturing system design. Three widely used methods that are K-means clustering algorithm, average-linkage clustering algorithm and fuzzy clustering using expectation maximization algorithm for cell formation problem are studied. A real life application of these methods for the design of cylinder department of a construction equipment manufacturer is performed. The performance of each applied algorithm is evaluated according to intracellular voids, intracellular processing intensity and intercellular transportation measures. The application results indicate that K-means clustering algorithm, which is the most widely applied and most known one of classical clustering algorithms, is still an effective method for cell formation.

**Keywords:** Cellular Manufacturing, Cell Formation, K-Means Algorithm, Average Linkage Clustering Algorithm, Expectation Maximization Algorithm

## İmalat hücresi oluşturulması için farklı kümeleme yöntemlerinin performans karşılaştırması

### ÖZ

Bu çalışma, hücresel imalat sistemi tasarımının temel ve önemli aşaması olan hücre oluşturmaya değinmektedir. Çalışmada hücre oluşturma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan üç yöntem; k-ortalamalar kümeleme algoritması, ortalama bağlantılı kümeleme algoritması ve beklenti maksimizasyonu algoritmasını kullanan bulanık kümeleme algoritması incelenmektedir. Bir inşaat ekipmanı üreticisinin silindir bölümünün tasarımı için bu yöntemlerin gerçek hayat uygulaması gerçekleştirilmiştir. Uygulanan her algoritmanın performansı hücre içi boşluklar, hücre içi işlem yoğunluğu ve hücreler arası taşıma miktarı ölçütlerine göre değerlendirilmektedir. Uygulama sonuçları, klasik kümeleme algoritmalarından en çok bilinen ve en yaygın olarak uygulanan k-ortalamalar kümeleme algoritmasının hücre oluşturma için hala etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Hücresel imalat, Hücre oluşturma, K-ortalamalar algoritması, Ortalama bağlantılı kümeleme algoritması, Beklenti maksimizasyonu algoritması

<sup>1</sup> Istanbul University, Industrial Engineering Department, Avcılar/TURKEY, sinemb@istanbul.edu.tr

<sup>2</sup> Istanbul University, Industrial Engineering Department, Avcılar/TURKEY, fatih.tuysuz@istanbul.edu.tr

## 2. CELLULAR MANUFACTURING SYSTEMS (CMS)

### 1. INTRODUCTION

Global competition, changing market conditions and variability in customer demands, which are causing shorter product life cycles, force manufacturing firms to more focus on flexibility and productivity to be able sustain in such an environment. Group Technology (GT) that was introduced by Mitrofanov [1] is a theory of management based on the principle that similar things should be done similarly [2]. Cellular manufacturing (CM), which is the implementation of group technology, is an important modern manufacturing alternative to achieve mid-volume and high-variety production [3]. CM is a hybrid system, which takes the advantage of flexibility of job shops and efficiency of flow shops [3][4]. Design of CM systems is a three-step process that consists of cell formation, intracellular layout and cell layout [5]. Cell formation (CF), which can also be called as part-machine grouping problem, is the fundamental and crucial step of CM system design. CF requires forming part families according to their processing similarities, grouping machines into manufacturing cells and assigning part families to cells [6]. The objective of CF is forming manufacturing cells, which are independent of other cells. In other words, the transfer between the cells are tried to be minimized so that each part family is finished within the cell it is assigned, which is quite difficult to be achieved in real life applications.

This study handles CF problem and presents three methods that are K-means clustering algorithm, average-linkage clustering algorithm and fuzzy clustering using expectation maximization algorithm. These three efficient and easy to use algorithms are applied for the same problem and their performances are compared according to three performance measures, which are intracellular voids, intracellular processing intensity and intercellular transportation criteria. The organization of the paper can be summarized as follows. CF problems and performance measures for CF with a brief literature review will be introduced. Then, the methods used in the study will be explained and the applications of these methods together with performance measures will be given. Finally, results and conclusions will be presented.

Cellular manufacturing, an application of the philosophy of "group technology", seeks to achieve efficiency in production by taking advantage of similarities between parts. In other words, the goal of this system is to get more output with less costs and better quality in shorter time. In a cellular manufacturing system, the cell is composed of part families and similar machine groups [7]. The purpose of cell formation is to create separated machine groups in which parts are processed with maximum interactions than the other cells.

The well-known benefits of the cellular manufacturing systems are given below [8][9]:

- *Material handling is reduced:* In the CMS, the part is processed in a cell. Thus, material handling is reduced due to the simplified workflow.
- *Production time is shortened:* By using the advantage of flow type production in the CMS, the production period of parts can be reduced.
- *The setup time is reduced:* Since similar parts are grouped in CMS, similar configurations are required for these parts, which help to reduce the setup time. With the development of flexible manufacturing systems, automatic tool changers reduce the setting, reduce the machining time and produce high quality products at low cost.
- *Batch size can be minimized:* Since the adjustment period in the CMS is greatly reduced, making small parties is economical.
- *The number of parts in the system is reduced:* The number of parts in the system and the amount of in-process stock will be lower because the production time is reduced in the CMS.
- *The delivery time is determined correctly:* The competence of the cell to produce predefined quantity of a part ensures that delivery time is determined more accurately and reliably.
- *Machine usage is reduced:* The effective capacity of the machine is increased due to the reduction of the setup times, which leads to a lower use.
- *The return on investment is fast:* The costs of lost production and resettlement of the machines can be easily recovered from

inventory, efficient usage of machines, labor and materials.

- *It saves labor:* Due to the utilization level of the cell is low; it is possible to assign a worker to more than one machine to lead better utilization of the workforce.
- *Quality procedure works easily:* Parts move from one station to another as single units or small parts in CMS. Hence parts are fully processed in a small area, the return of production is fast and the process can be stopped to find out what the error is.
- *Field acquisition:* Due to the reduction in the number of parts in the system, significant amounts of usable space for adding new machines and expanding can be gained.

In addition to its many benefits, CMS has also some weaknesses and objectionable aspects:

- *Difficulties in identifying family members:* The creation of family members and the assignment of machines to cells may not always be easy. Part families determined by considering their designs may not be suitable from the point of view of production operations.
- *Challenges of balancing workload among cells:* Balancing workflow within a cell is more difficult than balancing an assembly line. The parts can follow different orders in the cell, which requires different machines and processing times. Wrongly balanced cells can be very inefficient. It is very important to balance workload among the cells in CMS.
- *Employees need to be trained:* The training of employees for different tasks is costly, time consuming, and requires collaboration among employees.
- *Additional costs incurred by reorganization:* In CMS, multiple small machines are preferred to single large machines. It may be necessary to purchase additional cells for the same type of machines. In addition, the cost of the idle plant due to the relocation of the machines can also be high.

## 2.1. Cell Formation (CF)

The most important problem encountered in the design of CMS is cell formation. This problem, also referred as part-machine group analysis, influences the basic structure of the CMS and the whole layout.

Cell formation is concerned with determining the part families and the machine groups on which these parts are to be produced [10]. The basic assumption in CF is that the part families can only be produced in certain machines or machine groups. For this, the existence of relations between parts and machines is investigated. This relationship is called as routing [11]. When the relationships are determined, the parts are separated into the part families in which all the parts in the part family are produced in the same machine groups. What is required here is that as much processing as possible is carried out on the machines in which the parts within the desired families are assigned and the interaction between the cells is minimized. Once the part families are determined, the machines that the part families will be processed, are also grouped.

The success of the CF problem depends on considering the constraints that exist in the actual production environment. The most important constraints to consider in CF are as follows [12][13]:

- Available capacity of machines must not be exceeded.
- Safety and technological requirements must be met. The machines that can create dangerous interaction with each other must be physically farther away.
- Number of machines in a cell and number of cells must not exceed an upper bound.
- Inter-cell and intra-cell cost of handling material between machines must be minimized.
- Machine utilization rate must be as high as possible.
- Machine purchase and operating costs must be minimized. In CMS, the machines and equipment on the hands are placed to the cells in the most appropriate way. When necessary, new machinery and equipment are purchased.
- Work-in-process inventory costs must be minimized.

## 2.2. Cell Formation Methods

During the decades, many research papers have been done in literature about CF methods. Some of them have been introduced the classification of these methods. King and Nakornchai [14] examined the methods for grouping parts and associated machines in four subdivisions:



similarity coefficient methods, set theoretic methods, evaluative methods and other analytical methods.

Wemmerlöv and Hyer [11] divided the CF methods into two major groups based on the main data as either part attributes or machine routings. The latter branch for machine routings is further classified into three divisions, i.e. approaches that identify firstly the machine groups, approaches that identify firstly the part families, and the approaches that identify part families and machine groups simultaneously.

Selim et al. [10] categorized these approaches into five subsections that are descriptive procedures, cluster analysis, graph partitioning, artificial intelligence and mathematical programming.

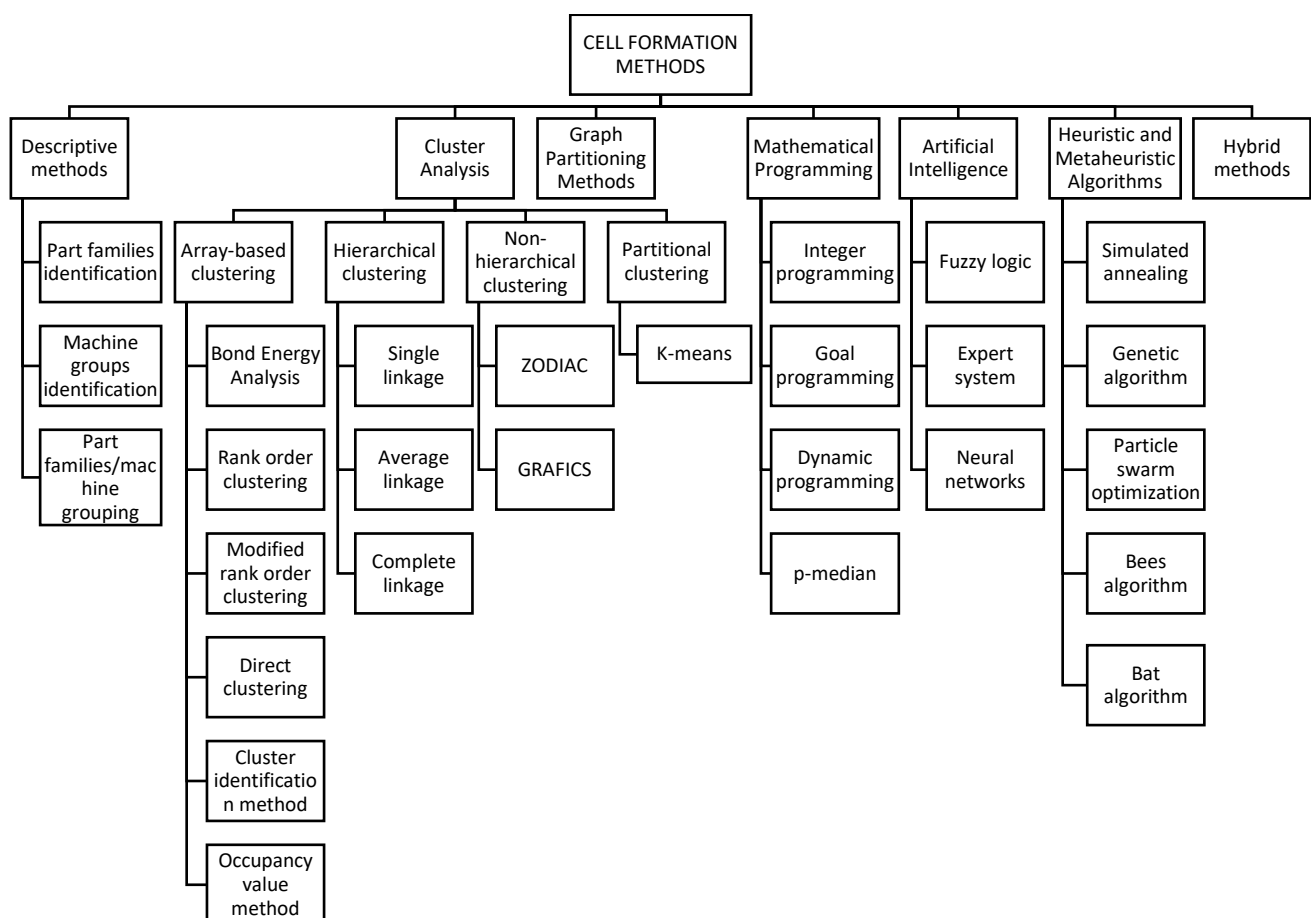
Adenso-Díaz et al. [15] classified the approaches as hierarchical, simultaneous and iterative. They

also considered the use of information about the sequence of operations or not in their classification. Another issue they marked for their classification is use of a machine-process plans binary incidence matrix or a machine-operation processing time matrix.

Papaioannou and Wilson [6] presented a detailed review about the evaluation of cell formation problem methodologies. They firstly categorized the approaches under three main headings: informal methods, part coding analysis methods and production-based methods. Then the production-based methods are classified as cluster analysis, graph-partitioning approaches, mathematical programming methods, heuristic and metaheuristic algorithms and artificial intelligence methodologies.

According to previous research papers, the CF methods can be summarized as shown in Figure 1 [7].

Figure 1. Classification of cell formation methods



### 2.3. Performance Measures

In literature, there have been a variety approaches that used the performance measures for appropriate machine/part clustering. Mosier [16] focused on four performance measures in their study, which are simple matching measure, generalized matching measure, product moment correlation coefficient measure and intercellular transportation measure.

Shafer and Meredith [17] compared the numerous cell formation techniques by using three companies' data with regard to average flow time, maximum flow time, average distance travelled, number of extra-cellular operations, average work-in-process (WIP) parts, maximum WIP and longest average queue.

Chu and Tsai [18] compared the rank order clustering algorithm, the direct clustering algorithm and the bond energy algorithm using the four performance measures: 1) total bond energy, 2) percentage of exceptional elements, 3) machine utilization and 4) grouping efficiency.

Morris and Tersine [19] presented a simulation model for layout choice, which examines the impact of changes in setup time, transfer time, material handling speed and flow within cell. They used mean throughput time and mean level of work-in-process (WIP) inventory as performance measures for their observations.

Miltenburg and Zhang [20] presented a comprehensive comparison of nine clustering methods. The final solutions were evaluated by using three independent measures that are grouping measure, clustering measure and bond energy measure.

Burgess et al. [21] compared the traditional job shop environment with the cellular manufacturing unit by different simulation combinations. They computed the ratio of actual flow time to optimum flow time and the ratio of machine delay time to optimum flow time for performance evaluation.

Rogers and Shafer [22] gave a detailed review and critique for the performance measures that were used in literature for comparing cell formation procedures. They categorized the performance measures into four subgroups: part volumes and sequencing not considered, part volumes considered, part sequencing considered and both part volumes and sequencing considered.

Sarker [23] provided information for different measures such as grouping efficiency, grouping efficacy, weighted grouping efficacy, grouping index, grouping capability index, and grouping measure. Sarker (2001) also introduced a new performance measure that is called doubly weighted grouping efficiency measure. This new measure showed better performance than some of the existing measures in order to capture both inter-cell and intra-cell movements in cellular manufacturing system.

Keeling et al. [24] examined optimal machine and part grouping for several problems from the literature using grouping genetic algorithm. Through their application, they investigated the impact of four efficiency measure that are grouping efficacy, grouping index, grouping capability index, doubly weighted grouping efficiency on various factory measures, such as flow time, wait time, throughput, machine utilization etc.

### 3. MATERIALS AND METHODS

In this study, the design of the cylinder department is dealt with in a new facility of a company that manufactures construction equipment that is taken from [25]. It is desired to see which of the different cell formation methods will be more suitable for the cylinder department. For this purpose, k-means clustering algorithm, average linkage clustering method and fuzzy clustering method with expectation maximization algorithm are applied to machine-part matrix of this department to obtain first clusters. Subsequently, clusters were tried to reach more understandable and stable machine-parts clusters by applying rank order clustering method. During the execution of the algorithms, attention has been paid to the formation of three cells and the prioritization of machine groups. The performance of the results was then assessed according to the intracellular voids, intracellular processing intensity and intercellular transportation criteria.

The machine-part matrix consisting of 12 machines and 19 parts, obtained for use in the study, is given in Table 1. The 1's on the table indicate that the part is processed on that machine whereas 0's indicate that is not.

Table 1. Machine-parts matrix for cylinder department

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
M1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
M2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
M3	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
M4	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
M5	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
M6	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
M7	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
M8	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
M9	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0
M10	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
M11	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1
M12	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0

Details of the methods used in this study are given below.

### 3.1. K-Means Clustering Algorithm

K-Means clustering algorithm, which is the most commonly used and known one of classical clustering algorithms, was developed by J. MacQueen [26]. The general logic of the algorithm is to divide a data set consisting of  $n$  data objects into  $K$  sets that is given as an input parameter. The goal is to maximize the intra-cluster similarities of the clusters obtained at the end of the partitioning process while minimizing the inter-cluster similarities. Cluster similarity is measured by the mean value of the distances between the center of gravity of the cluster and other objects in the cluster. The cluster similarity is defined as Eq. 1 [27].

$$J(c_k) = \sum_{x_i \in c_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (1)$$

where  $\mu_k$  is the center of gravity of the  $k^{th}$  cluster,  $x_i$  is the data object ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). The objective function of the K-Means clustering algorithm is as follows:

$$J(C) = \sum_{k=1}^K \sum_{x_i \in c_k} \|x_i - \mu_k\|^2 \quad (2)$$

The higher the value of the objective function indicates that the objects in the cluster are far from the cluster center. Likewise the lower value is the indicator that the objects are closer to the cluster center.

The steps of the K-Means clustering algorithm are given below:

**Step 1:** Initial cluster centers are chosen randomly or by various methods according to the given cluster number of  $K$ .

**Step 2:** Calculate the distance of each object to cluster centers and assign it to that cluster where it is closer.

**Step 3:** After all objects have been assigned, recalculate the new cluster centers in the direction of the objects included in that cluster.

**Step 4:** Repeat steps 2 and 3 until the cluster assignments of objects have not changed.

### 3.2. Average-Linkage Clustering Algorithm

Average Linkage Clustering (ALC) algorithm is one of the algorithms based on similarity coefficient. The selected similarity coefficient and the methodology used in the clustering process play an important role for accuracy of the final clusters. In this study the "Jaccard Similarity Coefficient" is used in ALC algorithm.

Calculation of the Jaccard similarity coefficient is given in Eq. 3 [28].

$$S_{ij} = \frac{c}{(a + b - c)} \quad 0 \leq S_{ij} \leq 1 \quad (3)$$

where  $S_{ij}$  is the Jaccard Similarity Coefficient between machine  $i$  and machine  $j$ ,  $c$  is the number of parts processed both machine  $i$  and machine  $j$ ,  $a$  and  $b$  are the number of parts processed machine  $i$  and machine  $j$ , respectively.

The steps of the ALC algorithm are as follows [9][29]:

**Step 1:** Calculate the similarity coefficients for all machine pairs and then create the similarity matrix.

**Step 2:** Group the two objects (two machines, a machine and a machine group or two machine

group) with the highest similarity coefficient.

**Step 3:** Update the similarity coefficient matrix according to Eq. 4.

$$S_{tv} = \frac{\sum_{i \in t} \sum_{j \in v} S_{ij}}{N_t \times N_v} \quad (4)$$

where  $N_t$  is the number of machines in group  $t$ , and  $N_v$  is the number of machines in group  $v$ .

**Step 4:** Go to step 5 if all the machines are grouped into a single machine group or predetermined number of machine groups has been obtained. Otherwise go back to step 2.

**Step 5:** Assign each part to the cell.

### 3.3. Fuzzy Clustering Using Expectation Maximization Algorithm

Expectation maximization (EM) algorithm, which works with the maximization principle of similarity, was first introduced by Dempster et al. [30]. The algorithm shows the probability that an object belongs to one of the existing clusters using probabilistic criteria rather than using definite distance criteria. At each iteration the EM algorithm first finds an optimal lower bound and then maximizes this bound to obtain an improved estimate. Hence the algorithm includes two steps that are called E-step (expectation-step) and M-step (maximization-step) respectively [31].

In the context of fuzzy clustering, an EM algorithm starts with an initial set of parameters and iterates until the cluster centers converge or the change is sufficiently small. Each iteration also consists of two steps [32].

**E-step:** Objects are assigned to clusters according to the existing fuzzy clusters or parameters of probabilistic clusters. In this step, the membership degree of each point in each cluster is calculated with Eq. 5.

$$w_{o,c_j} = \frac{\frac{1}{\text{dist}(o, c_j)^2}}{\frac{1}{\text{dist}(o, c_1)^2} + \frac{1}{\text{dist}(o, c_2)^2} + \dots + \frac{1}{\text{dist}(o, c_K)^2}} \quad (5)$$

$j = 1, 2, \dots, K$

where  $\text{dist}()$  is Euclidean distance,  $o$  is any point,  $c_j$  is cluster center and  $K$  is set of clusters. This means if the distance of the point to the cluster  $j$  is small, the membership degree of that point to the cluster  $j$  should be high.

**M-step:** Find the new clusters or the parameters that will maximize the expected probability or the sum of error squares. The equation used in that

step is given below.

$$c_j = \frac{\sum_{\text{each point } o} w_{o,c_j}^2 o}{\sum_{\text{each point } o} w_{o,c_j}^2} \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

### 3.4. Rank Order Clustering Method

Rank order clustering (ROC) method is one of the most common methods for generating cells that take the machine-part matrix as input. The computational simplicity of the ROC method plays a big role in its preference. First developed in 1980 by the King, the ROC method has changed over time in such a way that the shortcomings are removed. In this study, the original state of the method is used and the steps are as follows [33]:

**Step 1:** Assign weights for each column of the initial matrix starting from the rightmost column. The assignment weights are twice as high as the previous one. If number of columns is represented by  $m$ , each column by  $j$  and its weights by  $W$ , Eq. 7 calculates weight.

$$W_j = 2^{m-j} \quad (7)$$

**Step 2:** Write the sum of the column weights corresponding to the inputs "1" in the rows in lines. The sum of the weights is calculated with Eq. 8.

$$TW_i = \sum_{j=1}^m 2^{m-j} a_{ij} \quad (8)$$

where  $i$  is rows,  $j$  is columns,  $a_{ij}$  is binary (0,1) entries of matrix.

**Step 3:** Sort rows by top down so that  $TW_i$  values are decreasing.

**Step 4:** Assign the weights to the sorted rows from bottom to top so that each one is twice as big as the bottom one. The number of rows is represented by  $n$ .

$$W_j = 2^{n-i} \quad (9)$$

**Step 5:** Write the sum of the row weights corresponding to the inputs "1" in the columns in lines. The sum of the weights is calculated as follows.

$$TW_j = \sum_{i=1}^n 2^{n-i} a_{ij} \quad (10)$$

**Step 6:** Sort columns from left to right so that  $TW_j$  values are decreasing.

**Step 7:** It is checked whether block-diagonal structure is formed. If not, go to step 1 and repeat the algorithm. After a certain number of iterations of the algorithm, the result is the same as the previous iteration. This indicates that the best

solution is achieved according to the ROC algorithm and stop.

#### 4. RESULTS AND DISCUSSION

The K-Means algorithm is used first and the given machine-part matrix is allocated to the appropriate cells with paying attention to the formation of the three cells and the grouping of the machines.

The initial machine cells for the K-means algorithm are determined as follows:

Cell 1: M1, M2, M3, M4

Cell 2: M5, M6, M7, M8

Cell 3: M9, M10, M11, M12

As a result of the iterations carried out in EXCEL in line with this initial information, the cells, the machines placed in the cells and the parts processed by these machines are given in Table 2.

Table 2. Cells, machines and parts for K-Means clustering algorithm

CELLS	MACHINES	PARTS
1	M1, M4, M6	P1, P2, P5, P6, P8, P11, P12, P14, P17
2	M2, M3, M5, M7, M8, M9, M12	P2, P5, P6, P9, P11, P12, P15, P17, P18
3	M10, M11	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P16, P17, P18, P19

After the formation of these cells, rank order clustering method is carried out in each of the cells for more regular structure in the machine-part matrix.

Matrix structures of each cell with the K-Means algorithm are shown in Table 3, 4 and 5 respectively.

Table 3. The machine-part matrix for cell 1 with the K-Means clustering algorithm

	P1	P8	P14	P2	P6	P12	P5	P11	P17
M4	1	1	1	1	1	1			
M1	1	1	1				1	1	1
M6	1	1	1				1	1	1

Table 4. The machine-part matrix for cell 2 with the K-Means clustering algorithm

	P9	P15	P18	P2	P6	P12	P5	P11	P17
M2	1	1	1	1	1	1			
M3	1	1	1	1	1	1			
M7	1	1	1	1	1	1			
M8	1	1	1	1	1	1			
M9	1	1	1	1	1	1			
M12	1	1	1	1	1	1			
M5	1	1	1				1	1	1

Table 5. The machine-part matrix for cell 3 with the K-Means clustering algorithm

	P3	P4	P7	P10	P13	P16	P19	P1	P5	P8	P11	P14	P17	P2	P6	P9	P12	P15	P18
M11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1						
M10	1	1	1	1	1	1	1							1	1	1	1	1	1

As seen in Table 3, P1, P8 and P14 coded parts must be supplied together with the machines. When P2, P6 and P12 parts are processing on machine M4, the assignment of parts P5, P11 and P17 to machines M1 and M6 will minimize the idle conditions of the machines. In the cell 2, minimizing the idle conditions of the machines is done as follows: P9, P15 and P18 coded parts must be given to all machines as a group.

Table 6. Cells, machines and parts for average linkage clustering algorithm

CELLS	MACHINES	PARTS
1	M1, M6, M11	P1, P3, P4, P5, P7, P8, P10, P11, P13, P14, P16, P17, P19
2	M2, M3, M7, M8, M9, M10, M12	P2, P3, P4, P6, P7, P9, P10, P12, P13, P15, P16, P18, P19
3	M4, M5	P1, P2, P5, P6, P8, P9, P11, P12, P14, P15, P17, P18

After the formation of these cells, rank order clustering method is carried out in each of the cells for more regular structure in the machine-part matrix.

P2, P6 and P12 must be given as a group to all machines except the M5, and the M5 machine must process the P5, P11 and P17 coded parts.

The cells, the machines placed in the cells and the parts processed by these machine generated by the application of the average linkage clustering algorithm are given in Table 6.

Matrix structures of each cell with the average-linkage clustering algorithm are shown in Table 7, 8 and 9 respectively.

Table 7. The machine-part matrix for cell 1 with the average-linkage clustering algorithm

	P1	P5	P8	P11	P14	P17	P3	P4	P7	P10	P13	P16	P19
M11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M1	1	1	1	1	1	1							
M6	1	1	1	1	1	1							

Table 8. The machine-part matrix for cell 2 with the average-linkage clustering algorithm

	P2	P6	P9	P12	P15	P18	P3	P4	P7	P10	P13	P16	P19
M10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
M2	1	1	1	1	1	1							
M3	1	1	1	1	1	1							
M7	1	1	1	1	1	1							
M8	1	1	1	1	1	1							
M9	1	1	1	1	1	1							
M12	1	1	1	1	1	1							

Table 9. The machine-part matrix for cell 3 with the average-linkage clustering algorithm

	P1	P2	P6	P8	P12	P14	P5	P9	P11	P15	P17	P18
M4	1	1	1	1	1	1						
M5							1	1	1	1	1	1

For fuzzy clustering using expectation maximization algorithm, three random cluster centers were determined to form three clusters:

Center of Cluster 1: M7  
Center of Cluster 2: M4

## Center of Cluster 3: M11

Then, the distances of each point to these centers and the probabilities of each point being included in the clusters are calculated.

The cells, the machines placed in the cells and the parts processed by these machine resulting from repeated iterations of the fuzzy clustering using expectation maximization algorithm are given in Table 10.

Table 10. Cells, machines and parts for fuzzy clustering using expectation maximization algorithm

CELLS	MACHINES	PARTS
1	M2, M3, M7, M8, M9, M12	P2, P6, P9, P12, P15, P18
2	M10	P2, P3, P4, P6, P7, P9, P10, P12, P13, P15, P16, P18, P19
3	M1, M4, M5, M6, M11	P1, P3, P4, P5, P7, P8, P10, P11, P13, P14, P16, P17, P19

After the formation of these cells, rank order clustering method is carried out in each of the cells for more regular structure in the machine-part matrix. Matrix structures of each cell with

fuzzy clustering using expectation maximization algorithm are shown in Table 11, 12 and 13 respectively.

Table 11. The machine-part matrix for cell 1 with the fuzzy clustering using expectation maximization algorithm

	P2	P6	P9	P12	P15	P18
M2	1	1	1	1	1	1
M3	1	1	1	1	1	1
M7	1	1	1	1	1	1
M8	1	1	1	1	1	1
M9	1	1	1	1	1	1
M12	1	1	1	1	1	1

Table 12. The machine-part matrix for cell 2 with the fuzzy clustering using expectation maximization algorithm

	P2	P3	P4	P6	P7	P9	P10	P12	P13	P15	P16	P18	P19
M10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Table 13. The machine-part matrix for cell 3 with the fuzzy clustering using expectation maximization algorithm

	P1	P8	P14	P2	P6	P12	P5	P11	P17	P3	P4	P7	P10	P13	P16	P19	P9	P15	P18
M4	1	1	1	1	1	1													
M11	1	1	1				1	1	1	1	1	1	1	1	1	1			
M1	1	1	1				1	1	1										
M6	1	1	1				1	1	1										
M5							1	1	1								1	1	1

Following the creation of the individual machine-part matrices by three algorithms, the performance of the algorithms was evaluated according to the intracellular voids, intracellular processing intensity and intercellular transportation criteria.

The intracellular voids are the input of "0" in the formed cells and means that part is not processed in that machine. This is not desirable in the cells because it reduces the utilization of the machines and it is targeted that the least possible number of voids occurs while cells are being created. The numbers of intracellular voids of each cell

obtained from the three algorithm results are given in Table 14.

Table 14. The numbers of intracellular voids obtained from used algorithms

	The numbers of intracellular voids			
	Cell 1	Cell 2	Cell 3	TOTAL
K-Means Clustering Algorithm	9	21	12	42
Average-linkage clustering algorithm	14	42	12	68
Fuzzy clustering using expectation maximization algorithm	0	0	58	58

As shown in Table 14, the K-means clustering algorithm is more advantageous in terms of intracellular voids than the other two methods.

In machine-parts matrices, each part is not processed on every machine. This causes the resulting cells to vary in process intensity. Intracellular processing intensity is calculated by the following equation.

$$H = \frac{x}{w} \quad (11)$$

where  $H$  is intracellular processing intensity,  $x$  is total number of operations in the cell and  $w$  is the total number of elements in the cell. The intracellular processing intensities obtained by Equation 11 are presented in Table 15.

Table 15. The numbers of intracellular processing intensities obtained from used algorithms

	The intracellular processing intensities			
	Cell 1	Cell 2	Cell 3	AVERAGE
K-Means Clustering Algorithm	0.667	0.667	0.684	0,673
Average-linkage clustering algorithm	0,641	0,538	0,5	0,560
Fuzzy clustering using expectation maximization algorithm	1	1	0,411	0,804

As seen in Table 15, with fuzzy clustering using expectation maximization algorithm, the machines in the cells are working with a higher average.

During the formation of cells, it may not be possible to produce each part in a single cell.

Therefore, the parts that need to be processed in different cells will have to go through. During these movements a transport cost arises. Thus, when the cells are being created, it is aimed that the part will be released from the cell where it started to be processed. The intercellular transportations resulting from the three applied algorithms are given in Table 16.

Table 16. The numbers of intercellular transportations obtained from used algorithms

The number of intercellular transportations	
K-Means Clustering Algorithm	18
Average-linkage clustering algorithm	19
Fuzzy clustering using expectation maximization algorithm	19



## 5. CONCLUSION



In this study, CF that is the fundamental and important step in the design of CM system is investigated. Three methods, which are K-means clustering algorithm, average-linkage clustering algorithm and fuzzy clustering using expectation maximization algorithm for CF problem are studied. A real life application of these methods for the design of cylinder department of a construction equipment manufacturer is performed. The performance of each applied algorithm is evaluated according to 3 performance measures that are intracellular voids, intracellular processing intensity and intercellular transportation criteria. According to the results, average-linkage clustering algorithm gives the least performance with respect to the three performance measures. K-means clustering algorithm performs best with respect to intracellular voids and intercellular transportation criteria in terms of average. Fuzzy clustering using expectation maximization algorithm is the best with respect to intracellular processing intensity measure in terms of average. Although K-means algorithm is behind fuzzy clustering using expectation maximization algorithm according to intracellular processing intensity measure, as it can be seen in Table 15, it gives a more balanced cell formation. It can be concluded that K-means clustering algorithm which is the most widely applied and known one of classical clustering algorithms is still an effective method for CF. Since there have been developed many methods and techniques in literature for CF problem, for further research, the comparison of these methods with respect to developed performance measures can be a promising area for both better understanding the strengths and weaknesses of these methods and for developing a common approach to CF problem.

## REFERENCES

- [1] S. P. Mitrofanov, *The scientific principles of group technology*. Boston Spa, Yorks, UK: National Lending Library Translation, 1966.
- [2] R. G. Askin and C. R. Standridge, C. R., *Modeling and analysis of manufacturing systems*. John Wiley & Sons Inc, 1993.
- [3] B. Bootaki, I. Mahdavi and M. M. Paydar, "New criteria for configuration of cellular manufacturing considering product mix variation," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 98, pp. 413-426, August 2016.
- [4] M. Mohammadi and K. Forghani, "A hybrid method based on genetic algorithm and dynamic programming for solving a bi-objective cell formation problem considering alternative process routings and machine duplication," *Applied Soft Computing*, vol. 53, pp. 97-110, April 2017.
- [5] I. Mahdavi, E. Teymourian, N. T. Baher and V. Kayvanfar, "An integrated model for solving cell formation and cell layout problem simultaneously considering new situations," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 655-663, October 2013.
- [6] G. Papaioannou, J. M. Wilson, "The evolution of cell formation problem methodologies based on recent studies (1997–2008): Review and directions for future research," *European journal of operational research*, vol. 206, no. 3, pp. 509-521, November 2010.
- [7] V. Modrák, P. Semančo, "Developments in Modern Operations Management and Cellular Manufacturing," in *Operations Management Research and Cellular Manufacturing Systems: Innovative Methods and Approaches: Innovative Methods and Approaches*, V. Modrák, Ed., IGI Global, 2011.
- [8] A. I. Shahrukh, *Handbook of cellular manufacturing systems*. New York, John Wiley & Sons, 1999.
- [9] N. Singh and D. Rajamani, D., *Cellular manufacturing systems: design, planning and control*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [10] H. M. Selim, R. G. Askin and A. J. Vakharia, "Cell formation in group technology: review, evaluation and directions for future research," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 34, no. 1, pp. 3-20, January 1998.
- [11] U. Wemmerlöv and N. L. Hyer, "Procedures for the part family/machine group identification problem in cellular manufacturing," *Journal of Operations*

- Management*, vol. 6, no. 2, pp. 125-147, February 1986.
- [12] S. S. Heragu, "Group technology and cellular manufacturing," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 24, no. 2, pp. 203-215, February 1994.
- [13] S. S. Heragu and Y. P. Gupta, "A heuristic for designing cellular manufacturing facilities," *The International Journal of Production Research*, vol. 32, no. 1, pp. 125-140, 1994.
- [14] J. R. King and V. Nakornchai, "Machine-component group formation in group technology: review and extension," *The International Journal of Production Research*, vol. 20, no. 2, pp. 117-133, 1982.
- [15] B. Adenso-Díaz, S. Lozano, J. Racero and F. Guerrero, "Machine cell formation in generalized group technology," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 227-240, November 2001.
- [16] C. T. Mosier, "An experiment investigating the application of clustering procedures and similarity coefficients to the GT machine cell formation problem," *The International Journal Of Production Research*, vol. 27, no. 10, pp.1811-1835, 1989.
- [17] S. M. Shafer and J. R. Meredith, "A comparison of selected manufacturing cell formation techniques," *The International Journal of Production Research*, vol. 28, no. 4, pp.661-673, 1990.
- [18] C. H. Chu and M. Tsai, "A comparison of three array-based clustering techniques for manufacturing cell formation," *The International Journal of Production Research*, vol. 28, no. 8, pp.1417-1433, 1990.
- [19] J. S. Morris and R. J. Tersine, "A simulation analysis of factors influencing the attractiveness of group technology cellular layouts," *Management Science*, vol. 36, no. 12, pp. 1567-1578, 1990.
- [20] J. Miltenburg and W. Zhang, "A comparative evaluation of nine well-known algorithms for solving the cell formation problem in group technology," *Journal of operations management*, vol. 10, no. 1, pp. 44-72, 1991.
- [21] A. G. Burgess, I. Morgan and T. E. Vollmann, "Cellular manufacturing: its impact on the total factory," *The International Journal of Production Research*, vol. 31, no. 9, pp. 2059-2077, 1993.
- [22] D. F. Rogers and S. M. Shafer, "Measuring cellular manufacturing performance," in *Planning, Design and Analysis of Cellular Manufacturing Systems*, A.K. Kamrani, H.R. Parsaei and D.H. Liles Ed., Elsevier Science, B.V., pp.147-165, 1995.
- [23] B. R. Sarker, "Measures of grouping efficiency in cellular manufacturing systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 130, no. 3, pp. 588-611, May 2001.
- [24] K. B. Keeling, E. C. Brown and T. L. James, "Grouping efficiency measures and their impact on factory measures for the machine-part cell formation problem: A simulation study," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 20, no. 1, pp. 63-78, February 2007.
- [25] H. C. Babacan, "Çok Amaçlı Hücreyel İmalat Tasarımı ve Hidromek Silindir Üretim Tesisinde Bir Uygulama," Graduate Thesis, Gazi University, Ankara, Turkey, 2008.
- [26] J. MacQueen, "Some methods for classification and analysis of multivariate observations," In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, vol. 1, no. 14, pp. 281-297, 1967.
- [27] A. K. Jain, "Data clustering: 50 years beyond K-means," *Pattern recognition letters*, vol. 31, no. 8, pp. 651-666, 2010.
- [28] R. Real and J. M. Vargas, "The probabilistic basis of Jaccard's index of similarity," *Systematic biology*, vol. 45, no. 3, pp. 380-385, 1996.
- [29] Y. Yin and K. Yasuda, "Similarity coefficient methods applied to the cell formation problem: a comparative investigation," *Computers & industrial engineering*, vol. 48, no. 3, pp. 471-489, May 2005.
- [30] A. P. Dempster, N. M. Laird and D. B. Rubin, "Maximum likelihood from

- incomplete data via the EM algorithm,” *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (methodological)*, vol. 39, no. 1, pp. 1-38, 1977.
- [31] F. Dellaert, *The expectation maximization algorithm*. Georgia Institute of Technology, 2002.
- [32] J. Han, M. Kamber and J. Pei, *Data mining: concepts and techniques*. 3<sup>rd</sup> Edition, Elsevier, 2012.
- [33] J. R. King, “Machine-component grouping in production flow analysis: an approach using a rank order clustering algorithm,” *International Journal of Production Research*, vol. 18, no. 2, pp. 213-232, 1980.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 24.12.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 14.08.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.281035	

## Polipropilen/huntit kompozitlerinin mekanik, fiziksel ve morfolojik özellikleri

Yasin Kanbur<sup>\*1</sup>, Ümit Tayfun<sup>2</sup>

### ÖZ

Huntit hidromagnezit (HH) polimere eklenmeden önce, silan bağlayıcı kullanılarak polipropilen (PP) matris ile uyumlu hale getirilmiştir. Buna ek olarak, HH ile uyumlu olması amacıyla maleik anhidrit aşılansız PP (Ma-g-PP) matrisi ile de kompozitler oluşturulmuştur. Kompozit malzemeler, sanayide en sık tercih edilen yöntem olan eriyik karıştırma metodu ile laboratuvar ölçekli çift vidalı ekstruder kullanılarak, % 10 HH içerecek şekilde hazırlanmıştır. Granül haline getirilen kompozitler enjeksiyonlu kalıplama yöntemi ile şekillendirilmiştir. Hazırlanan kompozitlere sırasıyla çekme testi, dinamik mekanik analiz (DMA) ve erime akış indisi testleri uygulanmıştır. Numunelerin mekanik dayanımlarına ek olarak, dış hava şartlarında kullanımını belirlemek amacıyla su emme testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca toz parçacıkların polipropilen matris içinde dağılımını gözlemlemek amacıyla tarayıcı elektron mikroskopu (SEM) kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, silanlanmış HH ve Ma-g-PP kullanımı ile elde edilen kompozitlerin mekanik özelliklerinde iyileşme gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, silanlama işlemine tabi tutulmuş huntit ve Ma-g-PP kompozitlerinde huntit parçacıklarının PP matris içerisinde iyi dağılım gösterdiği ve parçacık ile polimer yüzeylerinin uyumlu olduğunu görülmektedir. Bu sonuç mekanik özelliklerdeki iyileşmeyi desteklemektedir. Kompozitlerin erime akış değerlerinde belirgin bir değişim olmamıştır. Bu sonuç, PP matrisine huntit dolgu maddesi eklenmesiyle polimerin işlenmesinde önemli bir sorunla karşılaşılmayacağını göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Polipropilen, Huntit, Yüzey Modifikasyonu, Kompozit Malzemeler

## Mechanical, physical and morphological properties of polypropylene/huntite composites

### ABSTRACT

Huntite hydromagnesite (HH) is compatibilised with the polypropylene (PP) matrix by using silane coupling agents before addition to polymer. In addition, composites with maleic anhydride grafted polypropylene (Ma-g-PP) matrix were prepared in order to compatible with HH. Composite materials which contain 10% HH content were prepared by using twin screw extruder which is the most common method in industry. Granulated composites were shaped with injection molding. Tensile test, dynamic mechanical analysis (DMA) and melt flow index tests were applied to composites, respectively. In addition to the mechanical properties of prepared composites, water absorption test of the composites were

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Karabük

<sup>2</sup> İnovasens Bilgi Teknolojileri, Teknopark İzmir, Urla, İzmir

performed to consider their outdoor usage conditions. Scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the dispersion of huntite particles inside the polypropylene matrix. Mechanical properties of composites obtained by using silanized huntite and Ma-g-PP were improved. SEM images show that composites which contain silanized huntite and Ma-g-PP have good dispersion of particles inside the PP matrix and particle surfaces were compatible with polymer surface. This results also support the mechanical test results. Distinct changes did not observed for the melt flow index results of the composites. This results indicate that addition of the huntite to the PP matrix causes no obvious problem to the processibility of the polymer.

**Keywords:** Polypropylene, Huntite, Surface Modification, Composite Materials

## 1. GİRİŞ

Polipropilen otomotiv [1,2], medikal [3,4], ambalaj endüstrisi gibi birçok alanda kullanılan en önemli endüstriyel polimerlerden biridir. Bazı uygulamalar için mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekebilir. Bu amaçla kullanılan katkı malzemelerinden bazıları arasında karbon siyahı [5], karbon nanotüp [6], cam yünü gibi malzemeler sayılabilir. Kompozit malzemelerde kullanılan katkı malzemelerinin daha iyi sonuç vermesi için kullanılan katkı malzemesi ile polimer matrisin yüzeylerinin uyumlu olması gereklidir. Eğer matris ile katkı malzemesinin yüzeyleri uyumlu değilse bu katkı maddesinin matris içerisinde toplanmasına neden olacağından, yüzey uyumlaştırıcı maddelerle iki yüzey birbirlerine uyumlu hale getirilebilir veya polimer yüzeyi uygun fonksiyonel grup ile fonksiyonlandırılabilir.

Huntit hidromagnezit, 1980'den bu yana özellikle plastik malzemelerin alev karşı direncini artırmada kullanılan doğal bir mineraldir [7]. Bu mineralin dünyadaki en büyük rezervi Türkiye'dedir. Bu mineral, ülkemizde Afyon, Denizli ve Isparta bölgelerinde bolca bulunmaktadır. Huntit, literatürde polietilen [8], polipropilen [9], etilen vinil asetat [10,11] ve termoplastik poliüretan [12-14] gibi değişik termoplastiklerde alev geciktirici olarak kullanılmıştır.

Bu çalışmanın ana amacı birçok sektörde ihtiyaç duyulan kompozit malzemelerin üretilmesinde ülkemizde mevcut bulunan kaynakların kullanımının araştırılmasıdır. Bu çalışmada ülkemizde yüksek miktarda rezervleri bulunan huntit hidromagnezit mineralinin, polipropilen

(PP) kompozitlerde dolgu malzemesi olarak etkin şekilde kullanımı araştırılmıştır. İnorganik dolgu maddeleri içeren polimer kompozitlerin özelliklerini en belirgin şekilde etkileyen faktör, dolgu ile polimer matrisi arasındaki arayüzey olduğu için bu çalışmada yüzeyi modifiye edilmiş huntit eklenmiş PP ile ticari olarak ana zincire uyumlaştırıcı aşılansız PP matrisi içerisine katılan huntit mineralinin mekanik özelliklere olan etkisi kıyaslanmıştır.

## 2. MATERYAL VE METOT

### 2.1. Kullanılan Malzemeler

### 2.2. Silanlama İşlemi, Kompozitlerin Hazırlanması ve Yapılan Testler

Dolgu maddelerinin silanlanması sırasında, HH oda sıcaklığında 2 saat süre ile % 2 APTES/etanol çözeltisi içerisinde karıştırılmıştır. Silanlama işleminin ardından süzülen numuneler etanol ile bir kaç kez yıkandıktan sonra, 100 °C sıcaklıkta 12 saat süreyle etüvde kurutulmuş çözücü uzaklaştırılmıştır. Silanlanmış huntit Si-HH olarak isimlendirilmiştir.

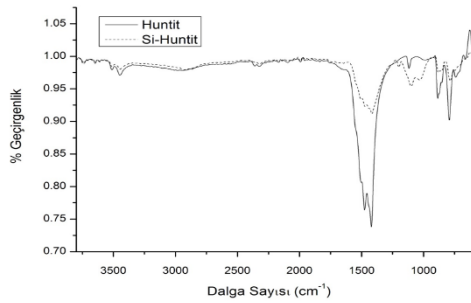
Kompozitler, DSM Xplore marka çift vidalı laboratuvar ölçekli mikro karıştırıcıda 100 rpm hızında, 200 °C sıcaklıkta ve 5 dakika süresince karıştırılarak hazırlanmıştır. Bütün kompozitler ağırlıkça % 10 oranında HH içermektedir. Hazırlanan granül formundaki kompozitlerin test numuneleri, DACA Instrument marka enjeksiyonlu kalıplama cihazı kullanılarak hazırlanmıştır. Enjeksiyonlu kalıplama esnasında kalıp sıcaklığı oda sıcaklığında tutulmuş, kovan sıcaklığı ise 210 °C olarak ayarlanmıştır. Numuneler 8 bar hava basıncı kullanılarak şekillendirilmiştir.

Çekme testi, Lloyd marka çekme cihazı kullanılarak 5 cm/dk çekme hızında ASTM D-638 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Su emme testi, numuneler oda sıcaklığında su banyosunda 15 günlük periyotta bekletilerek ASTM D-570 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Dinamik mekanik analiz (DMA), -50 °C ile 150 °C sıcaklık aralığında, 1 Hz sabit frekansta, 10 °C/dak hızında, bükme modu kullanılarak Perkin Elmer DMA 8000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Erime akış indisi (MFI) testi, kompozitlerin işlem sıcaklığında (200 °C), 2.16 kg sabit yük kullanılarak yapılmıştır.

### 3. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

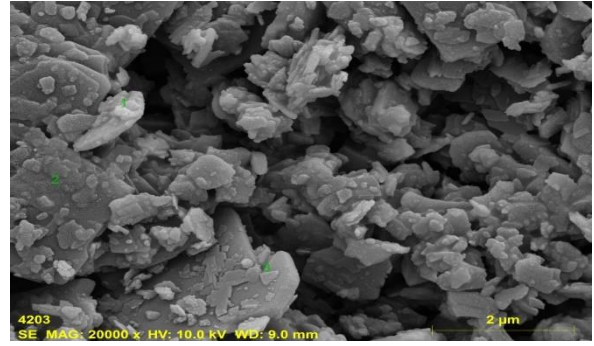
#### 3.1. Huntitin Yüzey Modifikasyonu

Yüzeyi silan uygulamasıyla modifiye edilmiş huntit ve saf huntitin FTIR-ATR spektrumları Şekil 1’de verilmiştir. Spektrumlar incelendiğinde modifiye edilmiş huntitin spektrumunda 1016 ve 1096  $\text{cm}^{-1}$  de elde edilen Si-O-C asimetrik vibrasyon pikleri silanlama işleminin gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 1. Huntit ve Yüzeyi Silanlanmış Huntitin FTIR-ATR Spektrumları

SEM-EDX analizi ile silanlanmış huntit partikülleri 3 farklı noktada incelenmiş ve yüzeyde ortalama % 1.35 oranında silikon (Si) ve % 0.62 oranında azot (N) olduğu belirlenmiştir (Şekil 2). SEM-EDX analizi sonuçları, FTIR-ATR analizinde elde edilen sonuçları desteklemekte ve silanlama işleminin başarıyla gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 2. Yüzeyi Silanlanmış Huntit'in SEM Görüntüsü

#### 3.2. Su Emme Testi

Tablo 1’de hazırlanan kompozitlerin su emme değerleri verilmektedir. Yaklaşık 15 gün su emme testine maruz bırakılan numuneler, genel olarak 3. günde sabit bir değere ulaşmıştır. Test sonunda huntit içeren PP, saf PP’ye kıyasla yaklaşık 2 kat su emme kapasitesine ulaşmıştır. Silanlanmış huntit içeren numunelerde silanlama işlemi sonrasında huntit yüzeyinin suyu sevmeyen organik gruplarla kaplanmasından dolayı, yüzeyi silanlanmış huntit içeren numunelerde modifiye edilmemiş huntit içeren numunelere nazaran daha az su emme gözlemlenmiştir. MA-g-PP/HH kompozitlerinin ise saf MA-g-PP’e göre daha fazla su emdiği görülmüştür.

Tablo 1. Kompozitlerin Su Emme Değerleri

Numuneler	Su Emilimi (g)
PP	0.22±0.02
PP/HH	0.40±0.04
PP/Si-HH	0.32±0.05
MA-g-PP	0.18±0.05
MA-g-PP/HH	0.55±0.02

#### 3.3. Çekme Dayanım Testi

Kompozitlerin çekme dayanımı değerleri Tablo 2’de verilmektedir. Çekme testi sonuçları incelendiğinde, huntit eklenmesinin PP matrisinin çekme dayanımı, kopmada uzama ve modül değerlerini bir miktar artırdığı gözlemlenmiştir. En yüksek çekme dayanımına ise yüzeyi silanlanmış huntit içeren kompozitlerde rastlanmıştır. Silanlanmış huntit içeren kompozitlerde meydana gelen bu artışın nedeni silanlama işlemi ile huntit yüzeyinin PP matris için daha uyumlu hale gelmesinden kaynaklanmaktadır. MA-g-PP matrisli olan kompozitlerde huntit eklenmesi kompozitlerin mekanik özelliklerini oldukça artırmıştır. Farklı olarak kopmada uzama değeri yaklaşık yarıya düşmüştür. MA-g-PP zincirlerindeki anhidrit grupları polipropilen

matrisini huntit minerali için daha uyumlu hale getirmiştir. Silanlanmış huntitin PP matrise eklenmesi ile çekme dayanımında neden olduğu artış % 7,3, MA-g-PP matrise HH eklenmesi ile çekme dayanımında artış ise yaklaşık % 6 olarak görülmüştür. Yüzey modifikasyonu işleminden sonra mekanik özelliklerdeki artışa, literatürde benzer çalışmalarda da rastlanmıştır [15,16].

Su emme testi uygulanan numunelerin çekme dayanım testi sonuçları, uygulanmayanlara nazaran çekme dayanımında çok az miktarda düşüş, uzama ve modül değerlerinde ise az miktarda artış göstermiştir.

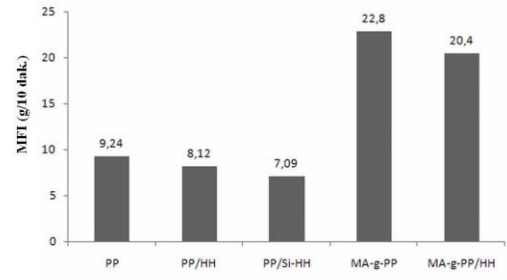
Tablo 2. Kompozitlerin Su Emme Değerleri

Numuneler	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopmada Uzama (%)	Young's 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/HH	25.4±0.6 /24.3±0.4*	443.1±9.8 /448.5±11.3*	27.5±3.5 /31.6±3.6*
PP/Si-HH	26.4±0.7 /25.7±0.8*	442.3±12.6 /467.0±15.9*	28.2±3.3 /33.1±4.2*
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/HH	22.7±0.4 /21.5±0.4*	268.5±5.0 /292.3±4.4*	335.9±5.6 /324.2±6.1*

\*15 günlük su emme testine tabi tutulmuş numunelerin çekme testi değerleri

### 3.4. Erime Akış İndeksi Testi

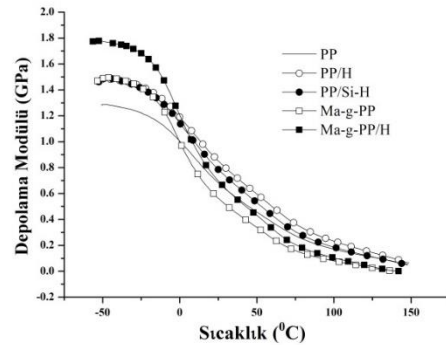
PP ve Ma-g-PP matrislerine huntit eklenmesi genel anlamda eriyik akış hızını çok fazla değiştirmemiştir (Şekil 3). Bu sonuç, kompozitlerin üretim işlemlerinde herhangi bir sıkıntıya (karıştırmada zorlanma veya enjeksiyonda tıkanma vb.) rastlanmayacağı anlamına gelmektedir. Huntit eklenmesi ile polimer moleküllerinin hareket kabiliyeti kısıtlandığı için erime akış indeksi değerlerinde bir miktar azalma gözlenmiştir. PP/huntit kompozitlerinin MFI değerleri incelendiğinde yüzeyi silanlanmış huntit içeren numunelerin erime akış indeksi değerlerinin, silanlanmamış numunelere göre düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni silanlama işlemine tabi tutulan huntitin yüzeyinin PP ile daha uyumlu olmasından kaynaklanmaktadır. Ma-g-PP matrisine huntit eklenmesi de benzer şekilde MFI değerinde bir miktar düşüşe sebebiyet vermiştir.



Şekil 3. Kompozitlerin Erime Akış İndeksi Değerleri

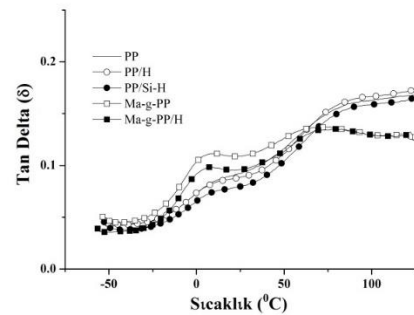
### 3.5. Dinamik Mekanik Analiz

Hazırlanan kompozitlerin depolama modülleri ve Tan  $\delta$  değerleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir. Huntit içeren kompozitlerin depolama modülleri, PP ile karşılaştırıldığında daha yüksek bulunmuştur. Modifikasyon uygulanmış huntit ile hazırlanan kompozitler ve saf huntit içeren kompozitler birbirine yakın ortalama değerler vermiştir. Huntit parçacıklarının PP ve Ma-g-PP matrisleri içerisine eklenmesi ile polimerin Tan  $\delta$  değerlerinde düşme, camsı geçiş sıcaklıklarında (T<sub>g</sub>) ise ufak artışlar gözlenmiştir.



Şekil 4. Kompozitlerin Depolama Modül Grafiği Figures and Tables

4. Kompozitlerin Depolama Modül Grafiği Figures and Tables



Şekil 1. Kompozitlerin Tan  $\delta$  Grafiği (Tan  $\delta$  Graph of the Composites)

### 3.6. Morfolojik Karakterizasyon

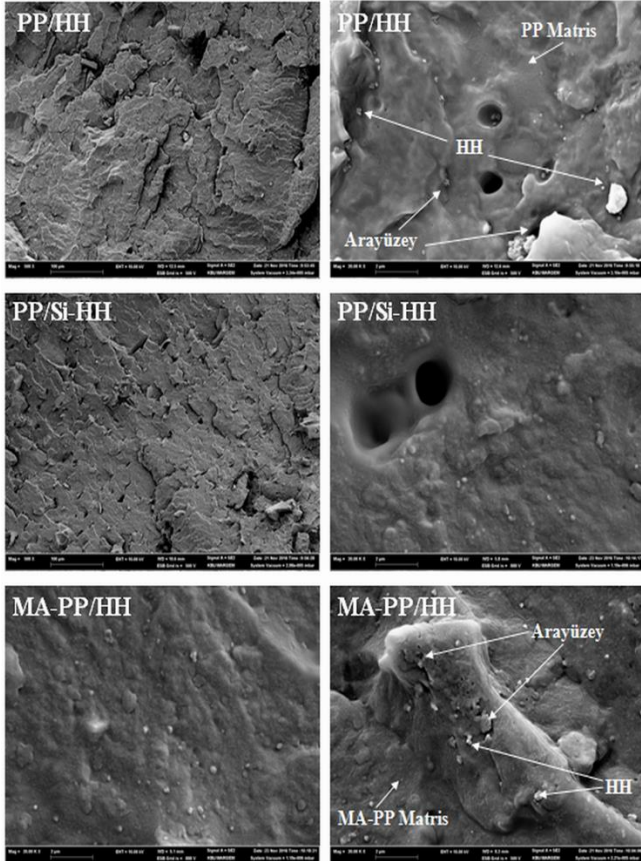
Kompozitlerin SEM mikroskopik görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde yüzeyi modifiye edilmemiş HH içeren

kompozitlerin PP matris içinde topaklandığı ve homojen karışmadığı, bunun sonucunda dolgu-polimer ara yüzeyinde boşluklar oluştuğu anlaşılmaktadır. Silanlanmış HH içeren kompozitin SEM fotoğrafları incelendiğinde, huntit partiküllerinin homojen olarak matris içerisinde dağıldığı ve parçacıkların polimer tarafından sarıldığı, topaklanmaların olmadığı gözlenmektedir. Bu gözlem, huntitin silanlanması sonucunda yüzeyde oluşan organik tabakanın polimer yüzeyi ile uyumlu olmasının bir sonucudur. Ayrıca Ma-g-PP matrisine huntit eklenmesiyle elde edilen kompozitlerde de aynı şekilde topaklanmaya rastlanmamış, huntit partiküllerinin homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu gözlemler, mekanik özelliklerin dolgu maddesinin silanlama ve maleik anhidrit aşılansız polimer matris kullanılmasıyla iyileşme göstermesi sonucunu desteklemektedir.

arayüzeyini uyumlu hale getirmek için huntit yüzeyine silanlama işlemine ek olarak ticari olarak maleik anhidrit aşılansız PP kullanılarak kompozitler hazırlanmıştır. Mekanik test sonuçları incelendiğinde, genel olarak silanlanmış HH ile hazırlanan kompozitler, modifiye edilmemiş HH içeren PP kompozitlere kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca silan ile kaplanmış HH, silikonun su sevmeyen yapısından dolayı eklendiği kompozitin su emmesini azaltmıştır. DMA analizi sonuçlarına göre; gerek PP, gerekse Ma-g-PP matrislerine HH eklenmesi, depolama modülü ve camsı geçiş sıcaklıklarını artırmıştır. Polipropilenin MFI değerlerinde HH eklendikten sonra belirgin bir değişim olmamıştır. Dolayısıyla kompozitlerin üretim işlemlerinde huntitin herhangi bir sorun teşkil etmeyeceği öngörülmektedir. SEM mikrografikleri incelendiğinde, silanlanmış HH parçacıklarının PP matrisi içinde homojen dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Yüzey silanlama işlemi polimer-dolgu arayüzey etkileşimlerini artırmıştır. HH içeren MA-g-PP ile kıyasla, PP matrisinde silanmış HH kullanımı bir miktar daha iyi sonuçlar sergilemiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] R. Stewart, V. Goodship, F. Guild, M. Green, J. Farrow, "Investigation and demonstration of the durability of air plasma pre-treatment on polypropylene automotive bumpers," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol.25(2), pp.93–99, 2005
- [2] W. Hufenbach, R. Böhm, M. Thieme, A. Winkler, E. Mader, J. Rausch, M. Schade, "Polypropylene/glass fibre 3D-textile reinforced composites for automotive applications," *Materials and Design*, vol. 32(3), pp.1468-1476, 2011.
- [3] C. Mao, C. Zhang, Y. Qui, A. Zhu, J. Shen, S. Lin, "Introduction of anticoagulation group to polypropylene film by radiation grafting and its blood compatibility," *Applied Surface Science*, vol.228(1-4), pp. 26-33, 2004
- [4] P. Tos, S. Artiaco, S. Coppolino, L.G. Conforti, B. Battiston, "A simple sterile polypropylene fingernail substitute,"





Şekil 6. Kompozitlerin SEM Mikrografları

## YORUMLAR

Bu çalışmada, ülkemizde bol miktarda bulunan huntit hidromagnezit mineralinin, polipropilen kompozitlerinin mekanik, fiziksel ve morfolojik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Polimer-dolgu



- Chirurgie de la Main*, vol.28(3), pp.143–145, 2009
- [5] Y.Kanbur, Z.Küçükyavuz, “Electrical and mechanical properties of polypropylene/carbon black composites,” *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, vol.28(18), pp.2251-2260, 2009.
- [6] S.P. Bao,S.C. Tjong, “Mechanical behaviors of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites: The effects of loading rate and temperature,” *Materials Science and Engineering:A.*, vol.485(1-2), pp.508-516, 2008.
- [7] H.Y. Atay, E. Çelik, “Use of Turkish huntite/hydromagnesite mineral in plastic materials as a flame retardant,” *Polymer Composites*, vol.31(10), pp. 1692-1700, 2010.
- [8] L. Haurie, A.I. Fernández, J.I. Velasco, J.M. Chimenos, J.M.L. Cuesta, F. Espiell, “Synthetic hydromagnesite as flame retardant. Evaluation of the flame behaviour in a polyethylene matrix,” *Polymer Degradation and Stability*, vol.91(5), pp. 989-994,2006.
- [9] B. Larsson, A.G. Incemin, G. Georgiades, C. Pust, “Huntite-hydromagnesite production and applications,” *12th Industrial Minerals International Congress*, Chicago, 1996, pp. 57-60.
- [10] H.Y. Atay, E. Çelik, “Mechanical properties of flame-retardant huntite and hydromagnesite-reinforced polymer composites” *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, vol.52(2), pp.182-188, 2013.
- [11] A. Basfar, H. Bae, “Influence of magnesium hydroxide (MH) and huntite hydromagnesite (HH) on mechanical properties of ethylene vinyl acetate (EVA) compounds cross-linked by dicumyl peroxide and ionizing radiation,” *Journal of Fire Sciences*, vol.28(2), pp. 161-180, 2010.
- [12] L.A. Savas, T.K. Deniz, U. Tayfun, M. Dogan, “Effect of microcapsulated red phosphorus on flame retardant, thermal and mechanical properties of thermoplastic polyurethane composites filled with huntite&hydromagnesite mineral,” *Polymer Degradation and Stability*, vol.135, pp.121-129, 2017.
- [13] T. Güler, U. Tayfun, M. Dogan, E. Bayramli, “Effect of expandable graphite on flame retardant, thermal and mechanical properties of thermoplastic polyurethane composites filled with huntite&hydromagnesite mineral,” *Thermochimica Acta*, vol.647, pp.70-80, 2017.
- [14] A.S. Dike, U. Tayfun, M. Dogan, “Influence of zinc borate on flame retardant and thermal properties of polyurethane elastomer composites containing huntite-hydromagnesite mineral,” *Fire and Materials*, DOI: 10.1002/fam.2428.
- [15] D. Metin, F. Tihminhoglu, D.Balköse, 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, 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.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 13-02-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 14-08-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.292019	

## Matkap geometrisinin delik kalitesi ve kesme performansına etkisi

Mehtap Yavuz <sup>\*1</sup>, Harun Gökçe<sup>2</sup>, Çağlar Yavaş<sup>3</sup> İhsan Korkut<sup>4</sup> Ulvi Şeker<sup>5</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada, farklı matkap geometrileri ve kesme parametrelerinin delme performansı üzerine etkileri sistematik bir şekilde incelenmiştir. Farklı geometrilere sahip dört tip matkap kullanılarak itme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülüğü ve geometrik toleranstan sapma değerleri ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda ticari olarak temin edilebilen yaygın iki takım geometrisi ile özgün iki kanal geometrisinin performansları test edilmiştir. Delme operasyonu, 10 mm çapında, iki ağızlı, helisel, yekpare sementit karbür matkaplar kullanılarak GGG 50 malzemesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Deney deseni için matkabin geometrik formu, kesme hızı ve ilerleme miktarı olmak üzere dörder seviyeli üç farklı kontrol faktörü ile bir Taguchi Deney Tasarımı oluşturulmuştur. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde Taguchi S/N analizi ve elde edilen verilerin işlendiği grafikler kullanılmıştır. Anova analizi yardımıyla da deney parametrelerinin deney sonuçları üzerindeki önemi ve etki oranları bulunmuştur. Deneysel sonuçlar değerlendirilerek optimum geometri ve optimum işleme şartları belirlenmiştir. Taguchi Sinyal-Gürültü analizinde “en küçük en iyidir” yaklaşımıyla değerlendirilen sonuçlara göre; ilerleme kuvveti, giriş-çıkış yüzey pürüzlülüğü, dairesellikten sapma ve diklikten sapma açısından özgün olarak geliştirilen 4 numaralı takım geometrisi diğer geometrilere üstünlük sağlarken, ilerlemenin en düşük olduğu (0,15 mm/dev.) ve kesme hızının en yüksek olduğu (110-120 m/dak.) kesme parametreleri ise kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Delik Delme, Matkap Geometrisi, GGG 50, Optimizasyon, Taguchi Metodu

## Effect of drill geometry on hole quality and cutting performance

### ABSTRACT

In this study, the effects of different drill geometries and cutting parameters on drilling performance have been systematically investigated. Using four types of drills with different geometries, thrust, torque, surface roughness and geometric tolerance deviations are measured. Experimental studies have tested the performance of commercially available two-tool geometry and developed original two-channel geometry. The drilling operation was performed on GGG 50 material using a 10 mm diameter, two-spindle, helical, solid cementitious carbide drills. For experiment design, a Taguchi Test Design was created with three different control factors of four levels, geometric form of drill, cutting speed and feed. The taguchi S/N analysis and the graphs in which the obtained data were processed were used in the evaluation of the test results. With the help of the Anova analysis, importance and influence rate on the test results of experimental parameters found. Experimental results were evaluated and optimum geometry and optimum cutting conditions were determined. According to the results evaluated by "the smallest best" approach in Taguchi signal-noise analysis; The originally tool 4 has superiority to other geometries in terms of thrust force, Input-output surface roughness, deviation from circularity, deviation from perpendicularity, The cutting parameters with the lowest feed rate (0,15 mm/rev.) and the highest cutting speed (110-120 m/min.) were determined as the optimum levels of control factors.

**Keywords:** Drilling, Drill Geometry, GGG 50, Optimization, Taguchi Method

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Çankırı Karatekin Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Çankırı- mehtapyavuz@karatekin.edu.tr

<sup>2</sup> TÜBİTAK SAGE, Aerodinamik Birimi, Ankara- harungokce@yahoo.ca

<sup>3</sup> Karcan Kesici Takım San. ve Tic. Ltd. Şti., Ürün Geliştirme Bölümü, Eskişehir- c.yavas@karcan.com

<sup>4</sup> Gazi Üniversitesi, İmalat Müendisliği, Ankara- ikorkut@gazi.edu.tr

<sup>5</sup> Gazi Üniversitesi, İmalat Müendisliği, Ankara- useker@gazi.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Delik delme işlemi çok eski zamanlardan beri kullanılmasına rağmen, bu operasyonun verimliliğini arttırmak ve işleme maliyetini en aza indirmek hala araştırmacılar için önemli bir konu olmuştur [1]. Geçtiğimiz yüzyıl boyunca, helisel matkaplar üzerine çok önemli araştırmalar yapılmış ve bu kesici takımlar endüstride yaygın olarak kullanılmıştır. Şu ana kadar endüstride, 200'den fazla farklı helisel matkap ucu görülmüştür [2].

Matkaplar en yaygın metal işleme takımları olmasına rağmen, talaş kaldırma mekanizması diğer yöntemlere göre daha karmaşık ve anlaşılması zordur. Delik delme işlemi ve delme performansını etkileyen birçok faktör mevcuttur. Bunlardan biri de matkap geometrisidir. Matkap uç geometrisi ile buna bağlı olarak oluşturulan matkap kanal formları matkabin en kritik tasarım kriterleridir. Bu geometrilerdeki en küçük değişiklik dahi talaş kaldırma performansını önemli ölçüde etkilemektedir [3]. Helisel matkap geometrisinin belirlenmesinde; düşük kesme kuvveti, yüksek aşınma direnci, yüksek burulma ve eğilme dayanımı, talaş tahliye yeteneği gibi farklı tasarım kriterleri vardır. Matkap tasarımında bu parametrelerin tamamının değerlendirilmesi yüksek düzeyde tecrübe gerektirir [4].

Matkap uç geometrisini değiştirerek kesme performansını arttırmaya, matkap ömrünü arttırmaya ve taşlama sürecini geliştirmeye yönelik birçok araştırma yapılmıştır. Delme işleminde tork, itme ve matkap ömrü, matkap performansını değerlendirmek için önemli kriterlerdir. Bu nedenle yapılan literatür araştırmasında görülmektedir ki tork ve itme üzerine çeşitli matkap çapları, matkap uç şekilleri, iş parçası malzemeleri, kesme koşulları ve talaşın kolayca uzaklaştırılması için birçok araştırma yapılmış ve tork ve itmeyi azaltmak için önemli bulgular veya tahminler elde edilmiştir. Fuji ve ark., matkap geometrisinde bulunan ve delme performansını doğrudan etkileyen karmaşık formların belirlenmesi için bir çalışma yapmışlardır. Matkap geometrisi, düşey ve eğimli kesme düzlemi olmak üzere iki farklı açıdan deneysel çalışmalar ile ele alınmış, matkap geometrisindeki profillerin, kesme parametrelerine etkisi belirlenmiştir [5]. Diğer bir çalışmalarında ise, matkap uç geometrisindeki radyal kesici kenarın, kesme performansına etkisini incelemiştir. Ayrıca,

matkap performansı için optimum koni açısı değerinin ne olması gerektiği ifade edilmiştir [6]. Tsai ve ark., matkap uç tasarımı ve taşlama parametreleri ile ilgili matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Yapılan çalışmada, konik, hiperbolik ve eliptik uç geometrisine sahip matkaplar modellenerek, taşlama parametrelerinin belirlenmesinde daha doğru tahminler yapabilmeyi ortaya koymuştur [7]. Thangaraj ve ark., delik delme sürecinde iki kenarlı matkaplarda oluşan sıcaklık dağılımını metalografik ve mikrosertlik teknikleri uygulanmıştır. Matkap performansının artırılması için optimum matkap geometrisinin yanında, malzeme sertliği, tokluğu ve sıcaklığa karşı davranışının da dikkate değer bir önem arz ettiğini vurgulamışlardır [8]. Chen ve diğerleri, split uçlu matkaplara etkileyen kuvvet ve momentin belirlenmesi amacıyla, split geometrisi matematiksel modeli hazırlanmıştır. Deneysel ve sonlu elemanlar analizleri sonucunda, JIS 45 iş parçası için, 8 mm çapında split uç geometrisine sahip bir matkabin, sabit devir sayısı (1030 dev/dak), delik derinliği (20 mm) ve ilerleme (0,12 mm/dev.) ortamında, optimum split açısı 57,70 olarak belirlenmiştir [9]. Ren ve ark. ise, matkap geometrisindeki kesici kenar açılarının talaş oluşumuna etkisini teorik bir çalışma ile incelemiştir. Hazırlanan matematiksel modeller ile yapılan analizler, kesme açılarının delik hatalarına %5 oranından daha az etki ettiğini göstermiştir [10]. Hocheng ve Tsao, helisel matkapların yanı sıra, farklı matkap geometrilerinin etkilerini de ele aldıkları çalışmalarında, farklı matkap türlerinin kullanımında, delaminasyonun (katmanlara ayırma) kapsamlı bir analizini sunmuşlardır. Bu analiz yapısında, delaminasyon seti üzerinde oluşan kritik ilerleme kuvvetleri tahmin edilmiş ve helisel matkap ile karşılaştırılmıştır [11]. Matkap geometrisi ve kesme parametreleri ile ilgili literatürdeki diğer çalışmalarda, delik delme işleminde helisel matkap uç geometrilerinin optimizasyonu incelenmiş ve özellikle matkap uç geometrisi, tork ve itme arasındaki ilişkiye bağlı olarak çeşitli matematiksel modeller geliştirilmiştir [12-25].

Yapılan çalışmalar ışığında, endüstride yaygın kullanım alanına sahip ve pek çok önde gelen kesici takım firmasının zorlandığı ve yüksek aşınma/düşük ömür sergilediği GGG50 malzemesinin delinmesi esnasında oluşabilecek problemlerin önüne geçilmesi ve delme performansının ve delik kalitesinin optimum

seviyeye getirilmesi için en uygun kesme şartlarının ve matkap geometrisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

## 2. MATERİYAL ve METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Deneyler için kullanılan Taguchi L16 deney tasarımı (Designing a Taguchi L16 experiment used for tests)

Deneyisel çalışmalar için dört seviyeli üç farklı kontrol faktörü ile bir Taguchi Deney Tasarımı oluşturulmuştur. Deney girdisi olarak dört farklı geometride matkap, dört farklı kesme hızı ve dört farklı ilerleme değeri seçilmiştir. Kullanılan Minitab paket programı vasıtasıyla dört seviyeli Taguchi L16 deney tasarımı oluşturulmuştur. Kesme parametrelerinin belirlenmesinde; öncelikle üreticilerin katalog değerleri dikkate alınmıştır. Deneyler soğutma sıvısı kullanılarak yapılmıştır. Tablo 1’de söz konusu tasarımın seviyeleri ve kontrol faktörleri verilmiştir.

Tablo 1. Deneyler için kontrol faktörleri ve seviyeleri  
(Control factors and levels for experiments)

Faktörler	Birim	1. Seviy	2. Seviy	3. Seviy	4. Seviy
Geometri		1	2	3	4
Kesme Hızı	m/dk	90	100	110	120
İlerleme	mm/de v	0,15	0,20	0,25	0,30

Tablo 1’deki faktörler göz önünde bulundurularak, deneylerde kullanılan parametrelerin ilerleme kuvveti, moment ve delik kalitesine (giriş-çıkış yüzey pürüzlülüğü, dairesellik toleransı, silindiriklik toleransı, diklik toleransı) olan etkilerinin tespiti için Tablo 2’de Minitab istatistik yazılımı yardımı ile belirlenen deney tasarımı verilmiştir. Yapılan deneylerde 16 kesici takım ile 100 delik delme tekrarı yapılarak toplamda 1600 delik delme işlemi yapılmıştır.

Tablo 2. Taguchi L16 orthogonal deney tasarımı (Taguchi L16 orthogonal experiment design)

Deney No	Değişkenler	Geometri (A)	İlerleme (B)	Kesme Hızı (C)
1	A1B1C1	MG1	0,15	90
2	A1B2C2	MG1	0,20	100
3	A1B3C3	MG1	0,25	110
4	A1B4C4	MG1	0,30	120
5	A2B1C2	MG2	0,15	100
6	A2B2C1	MG2	0,20	90
7	A2B3C4	MG2	0,25	120
8	A2B4C3	MG2	0,30	110
9	A3B1C3	MG3	0,15	110
10	A3B2C4	MG3	0,20	120
11	A3B3C1	MG3	0,25	90
12	A3B4C2	MG3	0,30	100
13	A4B1C4	MG4	0,15	120
14	A4B2C3	MG4	0,20	110
15	A4B3C2	MG4	0,25	100
16	A4B4C1	MG4	0,30	90

### 2.2. Deneylerde kullanılan iş parçası malzemesi (Material of used workpiece)

Deneylerde iş parçası malzemesi olarak 30 mm kalınlığında ve 140 × 140 ebatlarında küresel grafitli dökme demir (GGG50) kullanılmıştır. Bu malzemenin kimyasal özellikleri Tablo 3’de, mekanik özellikleri Tablo 4’de verilmiştir.

Tablo 3. GGG50 Küresel grafitli dökme demirin bileşimi, % ağı (Component percentages of ductile cast iron) [26]

C	Si	Mn	P	S
3,60	2,42	0,430	0,010	0,005
Mg	Cr	Ni	Mo	Cu
0,045	0,053	0,048	0,047	0,01

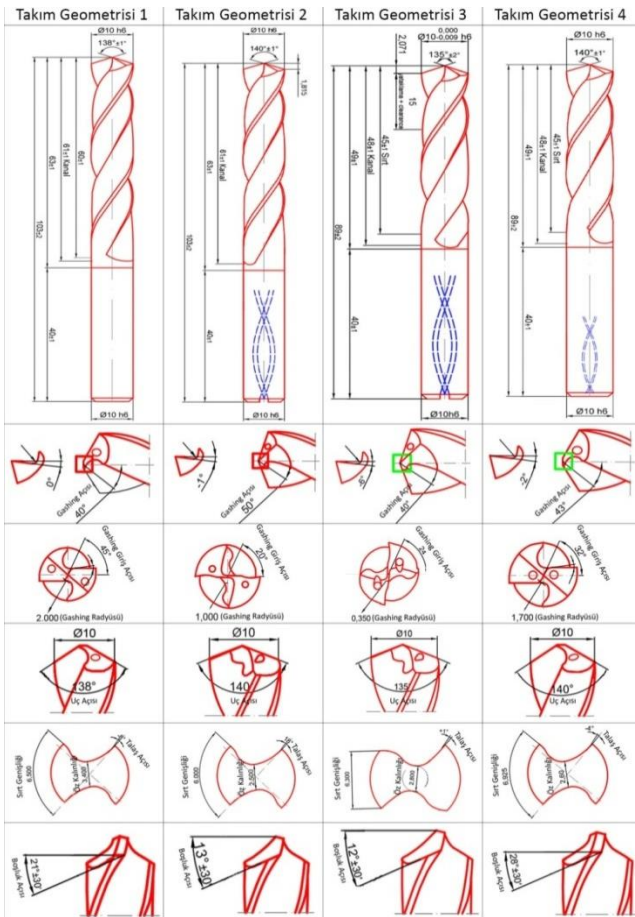
Tablo 4. GGG50 Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri, % ağı (Specifications of GGG50 material) [27]

Tür	Mikroyapı	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Sınırı (MPa)	Kopma Uzunluğu (%)	Brinell Sertliği (kgf/mm <sup>2</sup> )
GGG50	Ferritik-Perlitik	490,3	352,8	7	170-241

Bu malzemeden elde edilen deney numunelerinin şekli ve boyutları çalışma şartlarına bağlı olarak şekillendirilmiştir. 10mm takım çapı için  $3 \times D \leq L$  olacak şekilde, delinen malzemelerin kalınlığı 30 mm olarak işlenmiş ve delikler boydan delinmiştir. 100’er delik tekrarı sağlamak amacıyla her deney için ikişer adet plaka kullanılmıştır.

### 2.3. Deneylerde kullanılan kesici takımlar (Used cutting tools in experimental setup)

Bu çalışmada iki ağızlı, helisel, 10 mm çaplı, yekpare, karbür, içten soğutmalı matkaplar kullanılmıştır. Matkaplardan ikisi ticari olarak temin edilebilen farklı firmalara ait takımlar (MG1 ve MG2), diğer ikisi ise özgün olarak geliştirilen takımlardır (MG3 ve MG4). Kullanılan matkap geometrilerine ait bilgiler Şekil 1’de verilmiştir.



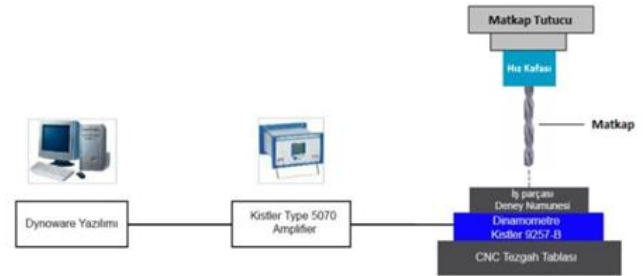
Şekil 1. Kullanılan kesici takım geometrilerine ait bilgiler (Information about cutting tool geometry used)

### 2.4. Yapılan ölçümler, kullanılan ölçüm tezgahları ve takım tezgahı (Performed measurements, used measurement tools and machine tools)

Deneyler, üç eksenli lineer ve dairesel interpolasyon yapabilen, metrik ve inç birimlerinde ISO formatlı programlanabilir Fanuc kontrol ünitesi Johnford VMC-550 CNC Dik İşleme Merkezinde yapılmıştır. İlerleme kuvveti ve moment ölçümleri için Kistler 9257-B tipi dinamometre ve Kistler Type 5070 amplifiyer kullanılmıştır. Takım içinden soğutma uygulaması

Giss SC-16 seramik hız kafası üzerinden gerçekleştirilmiştir.

İlerleme kuvvetleri ve momentleri ölçmek için kullanılan deney düzeneğinin bileşenleri Şekil 2’de görülmektedir. 100 delik delme tekrarında dinamometreden elde edilen verilerden 1., 10., 20., 30., 40., 50., 60., 70., 80., 90. ve 100. delik olmak üzere her şart için 11 deliğin kuvvet ve moment ölçümleri Dynoware yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Ortalama kuvvet ve moment değerlerinin alındığı ölçümlerde delik giriş ve çıkışındaki kararsız bölgeler ihmal edilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği (The experimental setup)

Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için “Mahr” marka Perthometer M1 tipi yüzey pürüzlülük ölçme cihazı kullanılmıştır. Her farklı şart için 1., 10., 20., 30., 40., 50., 60., 70., 80., 90. ve 100. delik sonrası oluşan yüzeylerin pürüzlülük değerleri, giriş ve çıkış bölgesinden dörder ölçüm yapılmış ve aritmetik ortalamaları alınmıştır. Ölçümler sonucu elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak her delik için girişteki ve çıkıştaki ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ,  $\mu\text{m}$ ) değerleri belirlenmiştir. Dairesellik, silindiriklik ve diklik toleransı ölçümleri, 0.001 mm hassasiyetinde ve tam ölçüm yapabilen Hexagon Global Performance CMM cihazı ile yapılmıştır.

### 3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (RESULTS OF THE EXPERIMENT AND DISCUSSION)

Aşağıda yapılan deneyler sonunda elde edilen ortalama ilerleme kuvveti ( $F_t$ ), Moment ( $M$ ), giriş yüzey pürüzlülüğü, çıkış yüzey pürüzlülüğü, dairesellik toleransı, silindiriklik toleransı ve diklik toleransı değerleri verilmiştir (Tablo 5). Bu değerler, 100 delik delme tekrarında 1., 10., 20., 30., 40., 50., 60., 70., 80., 90. ve 100. delik olmak üzere her şart için 11 deliğin ölçüm sonucu elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Tablo 5. GGG50 malzemesinin delinmesinde elde edilen ortalama ilerleme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülükleri, geometrik toleranstan sapmalar (Mean thrust force, moment, surface roughness, geometric tolerance deviations)

Deney No	Moment (N.cm)	İlerleme Kuvveti (N)	Giriş Yüzey Pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )	Çıkış Yüzey Pürüzlülüğü ( $\mu\text{m}$ )	Dairesellik Toleransı (mm)	Silindiriklik Toleransı (mm)	Diklik Toleransı (mm)
1	337,55	1060,68	1,834	1,874	0,018	0,011	0,021
2	431,72	1300,85	1,476	1,537	0,072	0,010	0,016
3	499,94	1498,43	1,357	1,438	0,015	0,008	0,027
4	630,99	1640,58	1,624	1,750	0,064	0,014	0,028
5	299,76	987,90	1,734	1,790	0,017	0,008	0,017
6	350,41	1201,99	2,175	2,172	0,034	0,007	0,022
7	422,70	1294,21	1,491	1,651	0,031	0,008	0,015
8	497,52	1452,76	1,469	1,518	0,034	0,011	0,018
9	403,49	1338,80	1,701	1,817	0,03	0,009	0,014
10	506,41	1664,64	1,629	1,738	0,039	0,017	0,019
11	611,05	2090,94	2,099	2,213	0,039	0,011	0,019
12	655,51	2354,93	1,676	1,705	0,030	0,023	0,023
13	311,27	886,19	1,202	1,246	0,022	0,009	0,012
14	414,11	1089,26	1,301	1,356	0,023	0,010	0,017
15	476,48	1249,65	1,598	1,795	0,026	0,013	0,016
16	527,25	1515,57	1,897	1,987	0,032	0,013	0,021
max.	655,51	2354,93	2,175	2,213	0,072	0,023	0,028
min.	299,76	886,19	1,202	1,246	0,015	0,007	0,012

### 3.1. İlerleme kuvveti ve momentin değerlendirilmesi (Thrust force and torque evaluation)

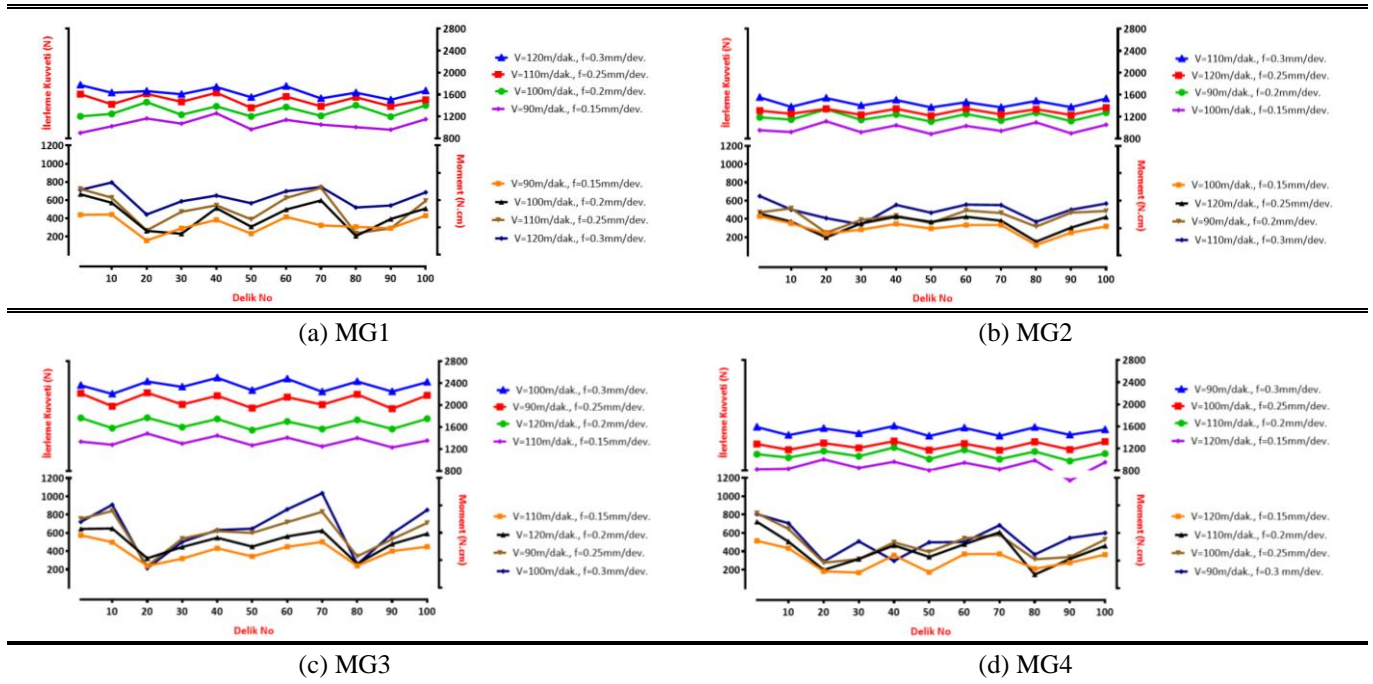
#### 3.1.1. Delme tekrarına göre ilerleme kuvveti ve momentin değerlendirilmesi (Thrust force and torque evaluation by drilling repetition)

İlerleme kuvveti ve moment ölçüm sonucu kullanılarak elde edilen ilk delikten son deliğe kuvvet ve moment değişimleri dört farklı matkap geometrisi için Şekil 3'deki grafikte gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde; her bir farklı matkabın farklı kesme şartları için ilk delikten son deliğe ilerleme kuvvetlerinde hemen hemen bir değişim olmamıştır. Grafiklerde görülen küçük sapmaların muhtemelen talaş kaldırma esnasında talaş sıkışmasına veya talaşın yeniden kesilmesine bağlı olduğu düşünülmektedir.

Kesme parametrelerine bağlı olarak ilk delikten son deliğe en düşük ve en yüksek ilerleme kuvveti değerlerinin; MG1 ile yapılan delik delme işlemlerinde 898-1774 N arasında, MG2 ile 887-1553 N arasında, MG3 ile 1227-2498 N arasında, MG4 ile 781-1607 N arasında değiştiği görülmektedir.

Buna göre en düşük ilerleme kuvvetinin görüldüğü matkap geometrileri sırasıyla; MG4, MG2, MG1 ve MG3 olarak kaydedilmiştir. En yüksek ilerleme kuvvetinin görüldüğü matkap geometrileri ise sırasıyla; MG3, MG1, MG4 ve MG2 şeklinde elde edilmiştir.

Diğer taraftan kesme parametrelerine bağlı olarak ilk delikten son deliğe en düşük ve en yüksek moment değerlerinin; MG1 ile yapılan delik delme işlemlerinde 157-794 N.cm arasında, MG2 ile 114-650 N.cm arasında, MG3 ile 213-1034 N.cm arasında, MG4 ile 147-815 N.cm arasında değişirken en düşük moment değerleri sırasıyla; MG2, MG4, MG1 ve MG3 ile sağlanmıştır. En yüksek moment değerleri ise sırasıyla; MG3, MG4, MG1 ve MG2 ile elde edilmiştir.

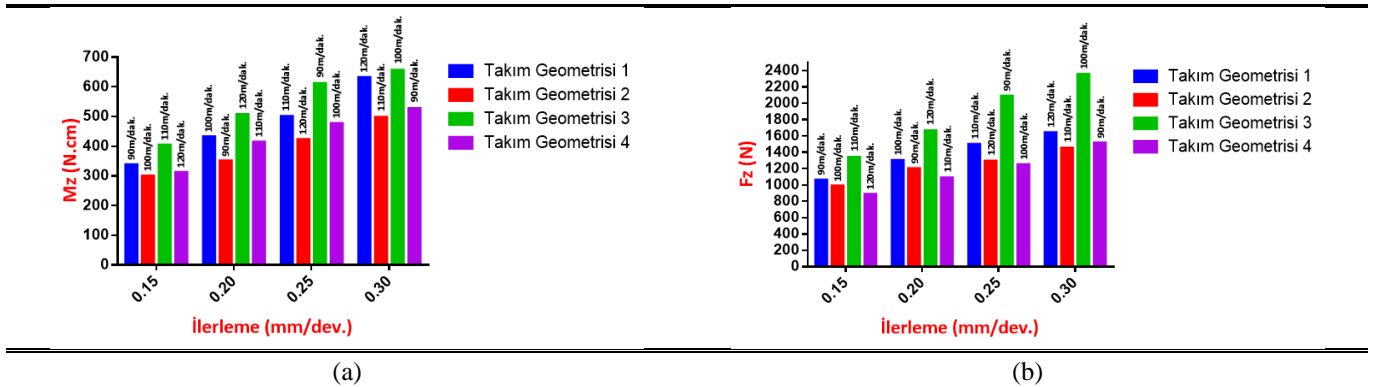


Şekil 3. Kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak  $F_1$  ve  $M$  değerlerindeki değişim  
(Depending on the change in the cutting parameters, the thrust force and torque change)

### 3.1.2. Kesme hızı ( $V_c$ ), ilerleme ( $f$ ) ve takım geometrisine göre ortalama ilerleme kuvveti ve momentin değerlendirilmesi (Average thrust force and torque evaluation according to cutting speed, feed rate and tool geometry)

GGG50 malzemesinin delinmesinde, ortalama ilerleme kuvveti ( $F_t$ ) ve ortalama moment ( $M$ ) değerlerinin, takım geometrisi, ilerleme ve kesme hızına göre değişimi Şekil 4'deki grafiklerde verilmiştir. Grafikler incelendiğinde her bir matkap geometrisinde ilerleme arttıkça ilerleme kuvveti ve momentin de arttığı görülmektedir.

İlerleme miktarının artması birim zamanda kaldırılan talaş hacminin artmasına neden olur. Bu da matkaba gelen yükü arttırmaktadır. Diğer taraftan, matkabin delik içerisinde ilerlemesi sırasında artan sıcaklık, sürtünme ve oluşan talaş sıkışması da bu artışa sebep gösterilebilir. Delik boyu arttıkça talaş sıkışmalarına bağlı olarak ısıda artmaktadır. Isı artışı ile ortaya çıkan talaşlar matkap üzerine sıvanarak matkabin rahat bir şekilde ilerlemesini engellemektedir.



Şekil 4. Kesme parametreleri ve takım geometrisine göre; a) Ortalama moment b) Ortalama ilerleme kuvveti değerleri  
(According to cutting parameters and tool geometry; change of average torque (a) and average thrust force (b))

İlerleme miktarına bağlı olarak moment ( $M$ ) ve ilerleme kuvvetindeki ( $F_t$ ) değişim incelendiğinde, dört farklı matkap için en düşük  $F_t$ - $M$ , deneylerde kullanılan en düşük ilerleme miktarı olan 0,15

mm/dev. ilerleme miktarında, en yüksek  $F_t$ - $M$  ise en yüksek ilerleme miktarı seçilen 0,30 mm/dev.'de elde edilmiştir. Genel anlamda deliğin delinmesi sırasında oluşan  $M$  ve  $F_t$  kuvvetlerinin

dağılımında matkap geometrisinin çok fazla etkisi olduğu görülmektedir.  $F_t$ -M grafiğinde en düşük ilerleme kuvvetinin elde edildiği MG4 ile delerken elde edilen kuvvet yaklaşık 886 N iken, en yüksek ilerleme kuvvetinin elde edildiği MG3 ile delerken elde edilen kuvvetin yaklaşık 2354 N olduğu görülmüştür. Yine bu grafikte en yüksek ve en düşük moment değerlerinin elde edildiği değerlere bakıldığında, MG2 ile delerken elde edilen moment yaklaşık 300 N.cm iken, MG1 ile delerken elde edilen momentin yaklaşık 655 N.cm olduğu görülmüştür.

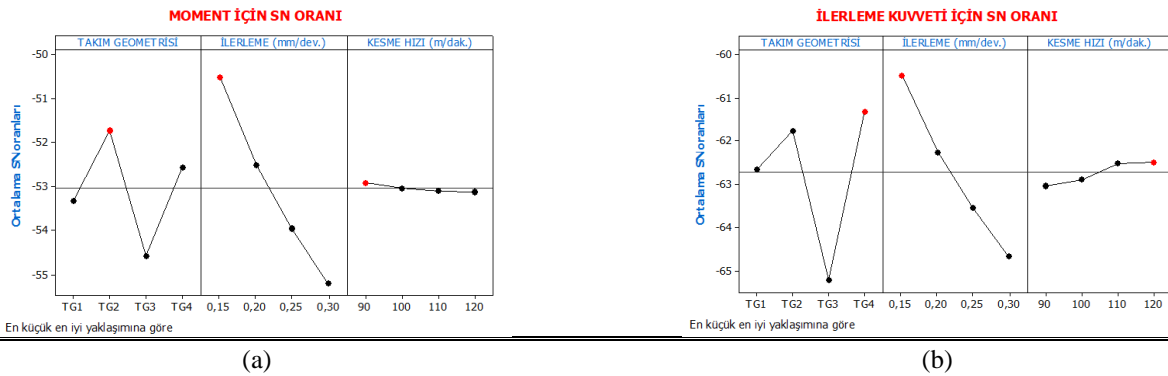
GGG50 malzemesine yönelik dört farklı matkap geometrisi için kullanılan tüm kesme şartlarında (ilerleme, kesme hızı) en yüksek M ve  $F_t$  değerleri sırasıyla; MG3, MG1, MG4 ve MG2 ile elde edilmiştir. Uç açısının büyüyen değerlerinde moment değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. MG3: 135°, MG1: 138° uç açısına sahip, MG2 ve MG4 ise 140° uç açısına sahiptir. En düşük moment değerleri, en büyük uç açısının kullanıldığı MG2 ve MG4'de gözlemlenmiştir. Genellikle daha düşük uç açısının torku artırdığı literatürde de yer almaktadır. Diğer taraftan en yüksek ilerleme kuvveti MG1 ve MG3'de meydana gelirken MG2 ve MG4'de daha az ilerleme kuvveti elde edilmiştir. Bu matkapların geometrileri incelendiğinde öz kalınlıklarının da ilerleme kuvveti üzerinde etkili olduğu saptanmıştır. Bu durum literatürdeki bilgilerle de örtüşmektedir. Radyal ağız, itme kuvvetine önemli derecede katkı sağlar ve bu katkının boyutu radyal ve ana kesici kenarların uzunluğuna bağlıdır. Çapın %20 sine eşit öz kalınlığına sahip tipik bir matkapta, radyal ağız itme kuvvetine yaklaşık %50 oranında katkıda bulunur [28].

### 3.1.3. Sinyal/Gürültü (S/N) analizine göre ortalama ilerleme kuvveti ( $F_t$ ) ve moment

### (M)'nin değerlendirilmesi (Evaluation of mean thrust force and torque according to (S/N) analysis)

Momentlerin en düşük olduğu seviyeler en iyi seviyeler olarak Taguchi (S/N) analizinde "en küçük en iyidir" yaklaşımıyla değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 5-a'deki grafikte gösterilmiştir. Şekil 5-a'daki grafikten yararlanarak yapılan moment optimizasyonunda, uygun kesme parametreleri "A2B1C1" olarak bulunmuştur. MG2'de ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 90 m/dak. kombinasyonundan en iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir.

İlerleme kuvveti için yapılan değerlendirme ise yine ilerleme kuvvetinin en düşük olduğu seviyeler en iyi seviyeler olarak Taguchi (S/N) analizinde "en küçük en iyidir" yaklaşımıyla değerlendirilmiş ve sonuçlar sonuçlar Şekil 5-b'deki grafikte gösterilmiştir. Grafiklerden yararlanılarak uygun kesme parametreleri "A4B1C4" olarak belirlenmiştir. MG4'de ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 120 m/dak. kombinasyonu en iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5. a) Ortalama moment (N.cm) için S/N oran grafiği b) Ortalama ilerleme kuvveti (N) için S/N oran grafiği (Mean S/N ratio graph for the torque (a) and the thrust force (b))

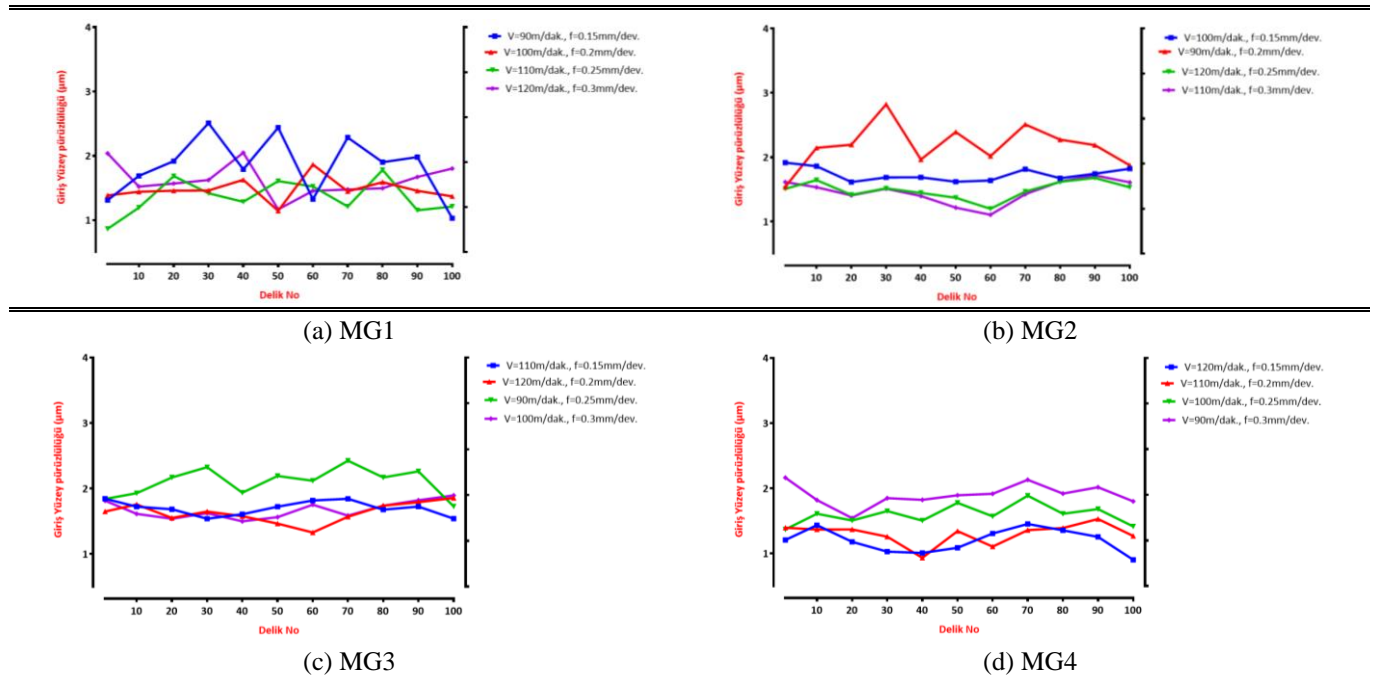


### 3.2. Delik içi yüzey pürüzlülüklerinin değerlendirilmesi (Evaluation of surface roughness in hole)

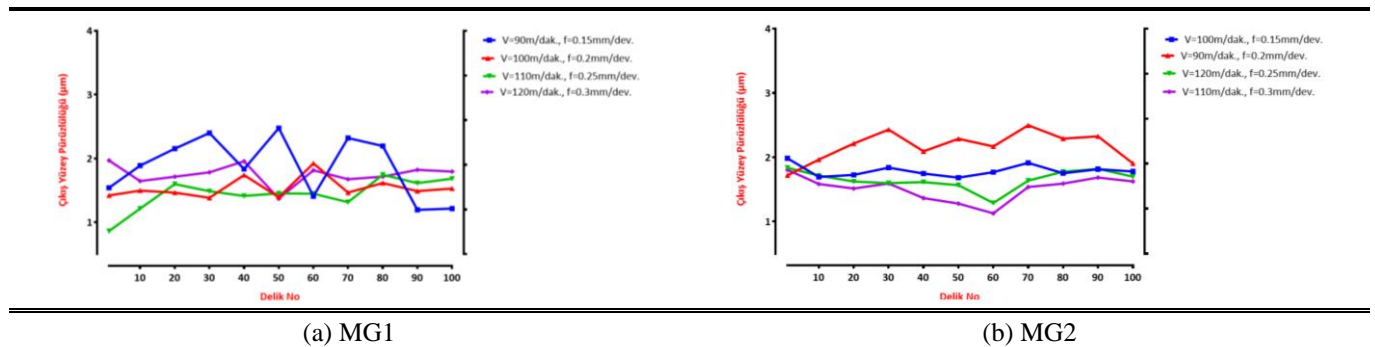
#### 3.2.1. Delme tekrarına göre yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi (Evaluation of surface roughness by repetition of drilling)

Yüzey pürüzlülük ölçüm sonucu kullanılarak elde edilen ilk delikten son deliğe giriş ve çıkış yüzey pürüzlülüğü değişimleri dört farklı matkap geometrisi için Şekil 6 ve Şekil 7'deki grafiklerde gösterilmiştir. Şekil 6'da gösterilen grafik incelendiğinde; kesme parametrelerine bağlı olarak ilk delikten son deliğe en düşük ve en yüksek giriş yüzey pürüzlülüğü değerlerinin; MG1 ile yapılan delik delme işlemlerinde 0,864-2,508  $\mu\text{m}$  arasında MG2 ile 1,105-2,822  $\mu\text{m}$  arasında, MG3 ile 1,328-2,424  $\mu\text{m}$  arasında, MG4 ile 0,903-2,163  $\mu\text{m}$  arasında değiştiği görülmektedir.

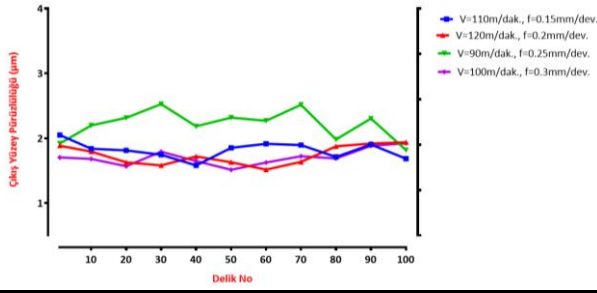
Buna göre en düşük giriş yüzey pürüzlülüğünü sağlayan matkap geometrileri sırasıyla; MG1, MG4, MG2 ve MG3 şeklindedir. En yüksek giriş yüzey pürüzlülüğünü sağlayan matkap geometrileri ise sırasıyla; MG2, MG1, MG3 ve MG4 şeklindedir. Şekil 7'deki grafiklerde; kesme parametrelerine bağlı olarak ilk delikten son deliğe en düşük ve en yüksek çıkış yüzey pürüzlülüğü değerlerinin; MG1 ile yapılan delik delme işlemlerinde 0,860-2,475  $\mu\text{m}$  arasında, MG2 ile 1,127-2,498  $\mu\text{m}$  arasında, MG3 ile 1,514-2,527  $\mu\text{m}$  arasında, MG4 ile 0,898-2,152  $\mu\text{m}$  arasında değiştiği görülmektedir. Buna göre en düşük çıkış yüzey pürüzlülüğü değerleri sırasıyla; MG1, MG4, MG2 ve MG3 ile sağlanmıştır. En yüksek çıkış yüzey pürüzlülüğü değerleri ise sırasıyla; MG3, MG2, MG1 ve MG4 ile elde edilmiştir.



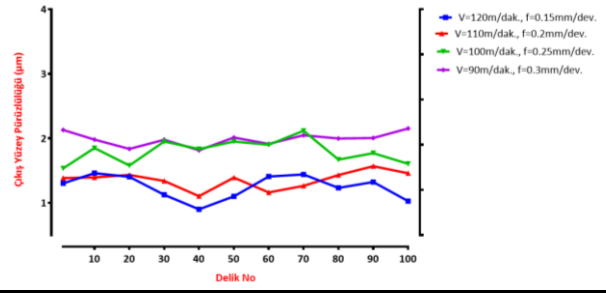
Şekil 6. Kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak giriş yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim (Depending on the change in the cutting parameters, the inlet surface roughness change)



Şekil 7. Kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak çıkış yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim (Depending on the change in the cutting parameters, the outlet surface roughness change)



(c) MG3



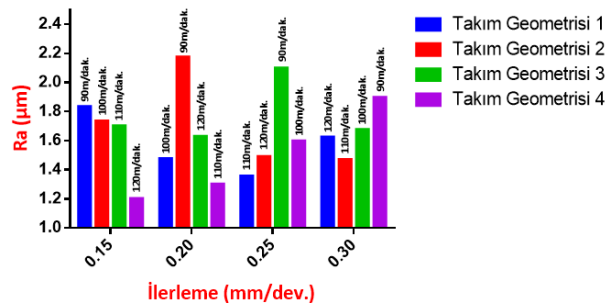
(d) MG4

Şekil 7. Kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak çıkış yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim (Depending on the change in the cutting parameters, the outlet surface roughness change)

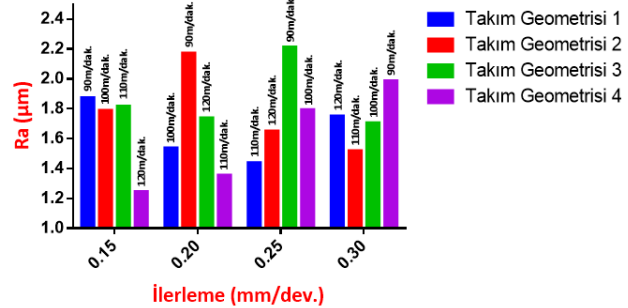
Her bir matkap geometrisi için tüm kesme şartlarında ilk delikten son deliğe yüzey pürüzlülüğü değerlerinde dalgalanmalar olduğu görülmektedir. Bu durum kesme hızının artmasıyla birlikte birim zamanda oluşan talaş hacminin artması ve talaş tahliyesini zorlaştırması ile açıklanabilir. Çünkü delik delme işlemi diğer işleme türlerinden farklı olarak talaş tahliyesi büyük bir problemidir. Talaş sıkışmasının takıma gelen yükleri artırarak titreşimin artmasına sebep olduğu ve takımın kesici kenarlarını ve delik yüzeylerini olumsuz etkilediği düşünülmektedir.

### 3.2.2. Kesme hızı, ilerleme ve takım geometrisine göre ortalama yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesi (Evaluation of average surface roughness according to cutting speed, feed rate and tool geometry)

GGG50 malzemesinin delinmesinde, ortalama Giriş Yüzey Pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ve ortalama Çıkış Yüzey Pürüzlülüğü ( $R_a$ ) verilerinin, takım geometrisi, ilerleme ve kesme hızına göre değişimi Şekil 8'deki grafiklerde verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 8. Kesme parametreleri ve takım geometrisine göre; a) Ortalama giriş yüzey pürüzlülüğünün değişimi b) Ortalama çıkış yüzey pürüzlülüğünün değişimi

(According to cutting parameters and tool geometry; change of average (a) inlet surface roughness and (b) outlet surface roughness)

Grafikler değerlendirildiğinde; kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülükleri azalmakta, ilerlemenin artması ile bazı takımlarda azalırken bazı takımlarda artmaktadır. Bu kararsız yapı kesme hızlarının değişimi ile açıklanabilir. Çünkü bu çalışmada Taguchi deney tasarımı kullanıldığından her şartta deney yapılamamıştır. Kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerindeki değişim incelendiğinde dört geometri içinde en düşük yüzey pürüzlülüğü deneylerde kullanılan en yüksek kesme hızları olan 110 ve 120 m/dak. kesme hızlarında, en

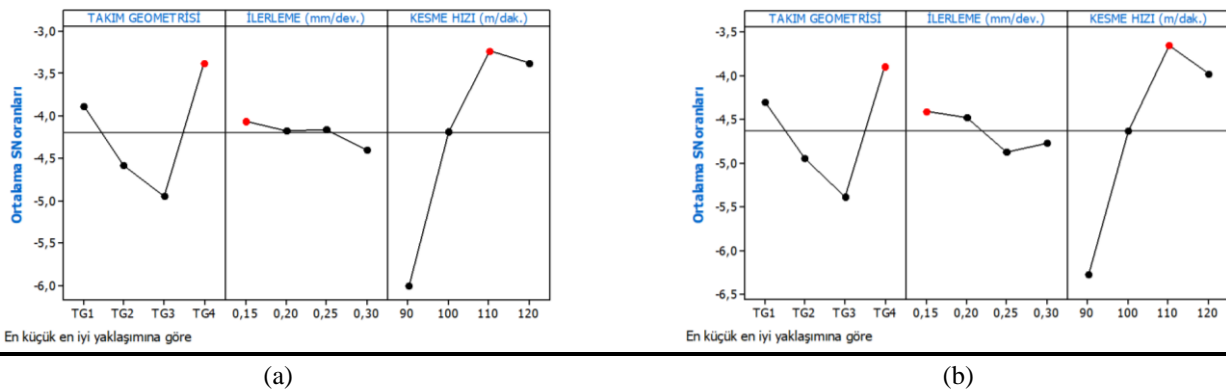
yüksek yüzey pürüzlülüğü ise en düşük kesme hızı seçilen 90m/dak.'da elde edilmiştir. Kesme hızlarının artmasıyla birlikte belli bir noktaya kadar artışın yüzey kalitesini olumlu etkilediği literatür çalışmalarında da belirtilmiştir [29]. İlerlemenin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün artması ise ilerlemenin artmasına bağlı olarak talaş hacminin artmasıyla açıklanabilir. Literatüre bakıldığında talaş kaldırma işlemlerinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrenin ilerleme miktarı olduğu görülmektedir [30].

Genel anlamda deliğin delinmesi sırasında matkap geometrisinin  $R_a$  üzerindeki çok fazla etkisi olduğu görülmektedir. Şekil 8  $R_a$  grafiğinde ortalama en düşük yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği MG4 ile delerken elde edilen giriş yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 1,202  $\mu\text{m}$  iken, en yüksek giriş yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği MG2 ile delerken elde yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık 2,175  $\mu\text{m}$  olduğu görülmüştür. Aynı şekilde ortalama en düşük çıkış yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği MG4 ile delerken elde edilen yüzey pürüzlülüğü yaklaşık 1,246  $\mu\text{m}$  iken, en yüksek yüzey pürüzlülüğünün elde edildiği MG3 ile delerken elde yüzey pürüzlülüğünün yaklaşık 1,738  $\mu\text{m}$  olduğu görülmüştür. GGG50 malzemesine yönelik dört farklı matkap geometrisi için kullanılan tüm kesme şartlarında (ilerleme, kesme hızı) en yüksek giriş yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla; MG2, MG3, MG4 ve MG1 ile, en yüksek çıkış yüzey pürüzlülük değerleri ise sırasıyla; MG3, MG2, MG4 ve MG1 ile elde edilmiştir. Giriş ve çıkış yüzey pürüzlülüklerine ait grafikler incelendiğinde her dört geometri için de, yüzey kalitesinin bir delme işleminden beklenen yüzey pürüzlülüğü değer aralığında (1,2 ila 2,4  $\mu\text{m}$  arası) olduğu görülmektedir.

### 3.2.3. Sinyal/Gürültü (S/N) analizine göre ortalama yüzey pürüzlülüğünün ( $R_a$ )'nın değerlendirilmesi (Evaluation of average surface roughness according to (S/N) analysis)

Yüzey pürüzlülüklerinin en düşük olduğu seviyeler en iyi seviyeler olarak Taguchi Sinyal-Gürültü analizinde “en küçük en iyidir” yaklaşımıyla değerlendirilmiş ve sonuçlar Şekil 9’da gösterilmiştir.

Şekil 9-a’da gösterilen grafikten yararlanarak yapılan giriş tarafındaki yüzey pürüzlülüğü optimizasyonu için uygun kesme parametreleri “A4B1C3” olarak bulunmuştur. MG4 ile ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 110 m/dak. kombinasyonu için en iyi sonuçların elde edildiği söylenebilir. Çıkış tarafındaki yüzey pürüzlülüğü için yapılan optimizasyonda ise, Şekil 9-b’den yararlanarak uygun kesme parametreleri yine “A4B1C3” olarak belirlenmiştir. MG4 ile ilerleme oranı 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 110 m/dak. kombinasyonunun en iyi sonuçları sergilediği görülmektedir.



Şekil 9. a) Giriş tarafındaki yüzey pürüzlülüğü için ( $\mu\text{m}$ ) ortalama S/N oranı grafiği b) Çıkış tarafındaki yüzey pürüzlülüğü için ( $\mu\text{m}$ ) ortalama S/N oranı grafiği ((Mean S/N ratio graph for the (a) inlet and (b) outlet surface roughness)

### 3.3. Geometrik toleranstan sapmaların değerlendirilmesi (Evaluation of the geometric tolerance deviation)

#### 3.3.1. Geometrik toleranstan sapmaların delme tekrarına göre değerlendirilmesi (Evaluation of deviation geometric tolerance deviation by repetition of drilling)

Geometrik toleranstan sapma ölçüm sonucu kullanılarak elde edilen ilk delikten son deliğe dairesellik, silindiriklik ve diklik toleransı değişimleri, 4 farklı matkap geometrisi için Şekil

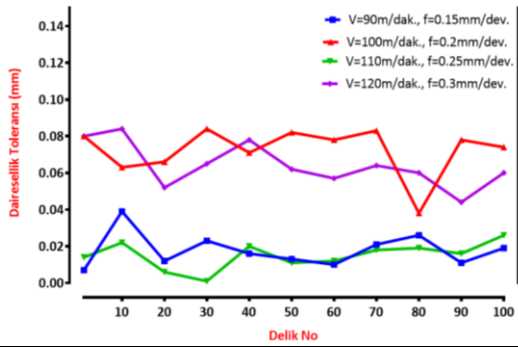
10, 11 ve 12’deki grafiklerde gösterilmiştir. Her bir takımın farklı kesme şartında ilk delikten son deliğe dairesellikten sapma değerlerinde hemen hemen bir değişim olmamıştır.

Şekil 10’daki grafikler incelendiğinde; kesme parametrelerine bağlı olarak ilk delikten son deliğe en düşük ve en yüksek dairesellik toleransı değerlerinin; MG1 ile yapılan delik delme işlemlerinde 0,001-0,084 mm arasında, MG2 ile 0,006-0,046 mm arasında, MG3 ile 0,013-0,054 mm arasında, MG4 ile 0,012-0,039 mm arasında değiştiği görülmektedir. Buna göre en düşük dairesellik toleransı değerleri sırasıyla; MG1,

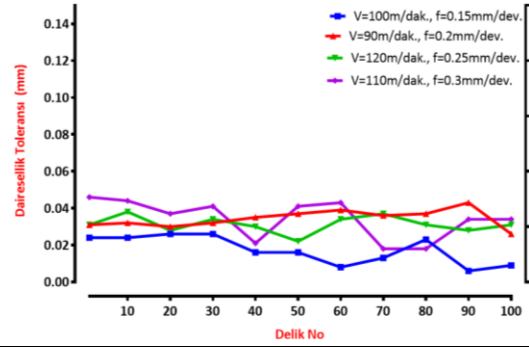
MG2, MG4 ve MG3 ile elde edilmiştir. En yüksek dairesellik toleransı değerleri ise sırasıyla; MG1, MG3, MG2 ve MG4 ile elde edilmiştir.

Her bir matkap için ilk delikten son deliğe silindiriklik toleransı değerlerinde hemen hemen bir değişim olmamıştır. Şekil 11'deki grafikler incelendiğinde; kesme parametrelerine bağlı olarak ilk delikten son deliğe en düşük ve en yüksek silindiriklik toleransı değerlerinin; MG1 ile yapılan delik delme işlemlerinde 0,002-0,023 mm arasında, MG2 ile 0,003-0,022 mm arasında, MG3 ile 0,004-0,034 mm arasında, MG4 ile 0,003-0,023 mm arasında değiştiği görülmektedir. Buna göre en düşük silindiriklik toleransı değerleri sırasıyla; MG3, MG1-MG2 ve MG4 ile elde edilmiştir. En yüksek silindiriklik toleransı değerleri ise sırasıyla; MG3, MG1-MG4 ve MG2 ile elde edilmiştir.

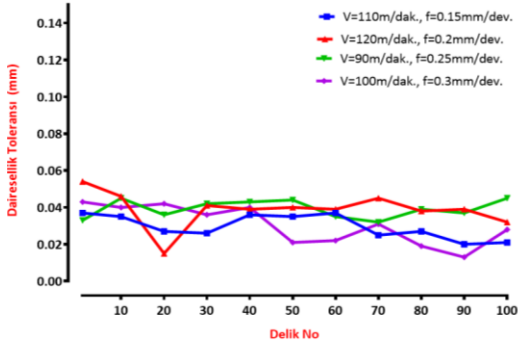
Her bir matkabın farklı kesme şartında ilk delikten son deliğe diklik toleransı değerlerinde hemen hemen her takım geometrisi için farklı kesme şartlarında iniş çıkışlar olduğu görülmektedir. Şekil 12'deki grafikler incelendiğinde; kesme parametrelerine bağlı olarak ilk delikten son deliğe en düşük ve en yüksek diklik toleransı değerlerinin; MG1 ile yapılan delik delme işlemlerinde 0,006-0,044 mm arasında, MG2 ile 0,001-0,037 mm arasında, MG3 ile 0,002-0,041 mm arasında, MG4 ile 0,002-0,042 mm arasında değiştiği görülmektedir. Buna göre en düşük diklik toleransı değerleri sırasıyla; MG2, MG4-MG3, ve MG1 ile elde edilmiştir. En yüksek diklik toleransı değerleri ise sırasıyla; MG1, MG4, MG3 ve MG2 ile elde edilmiştir.



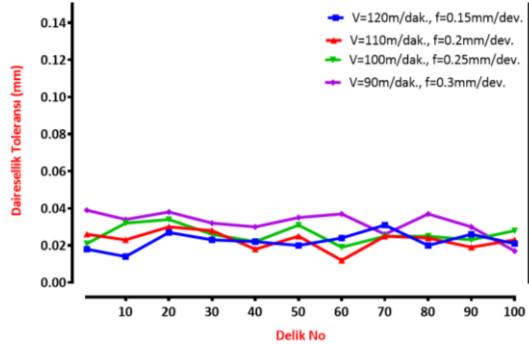
(a) MG1



(b) MG2

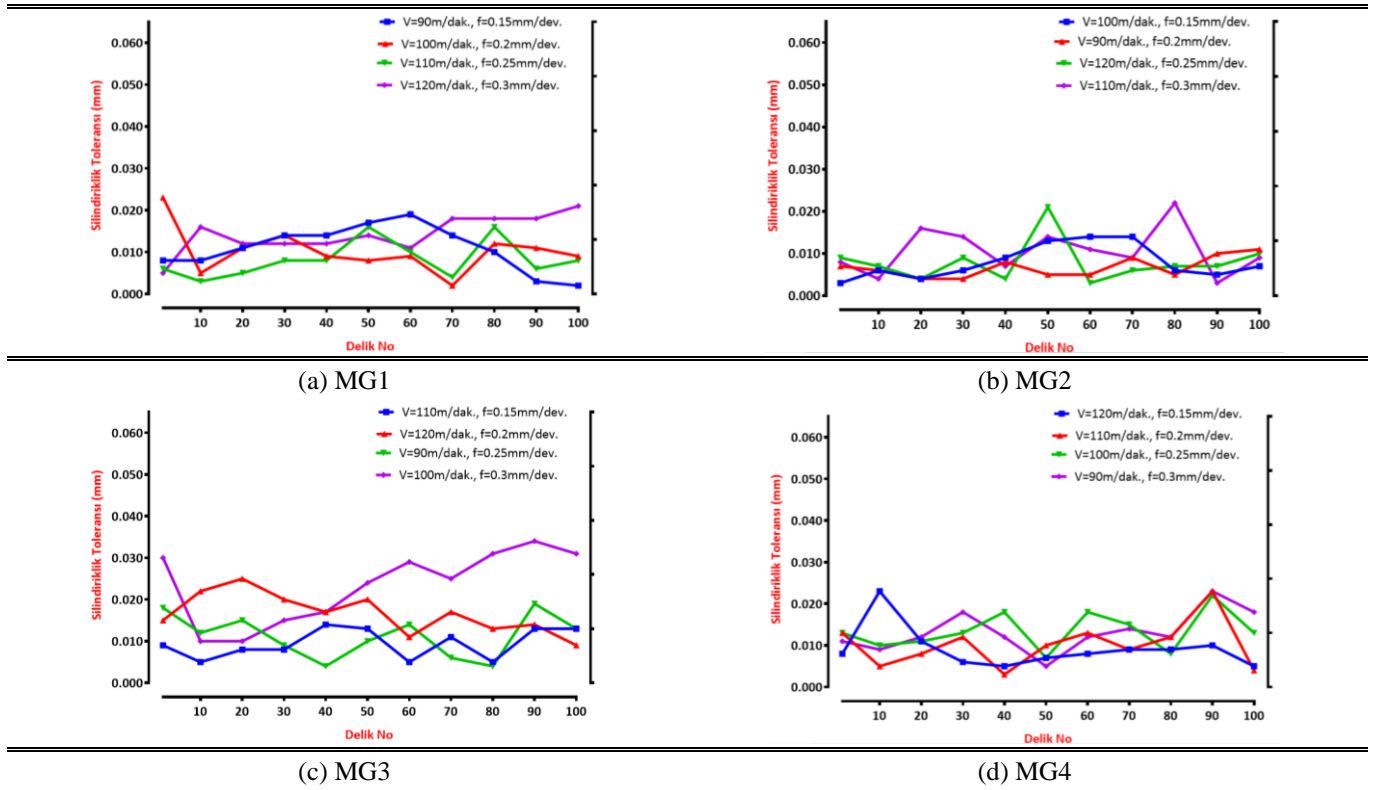


(c) MG3

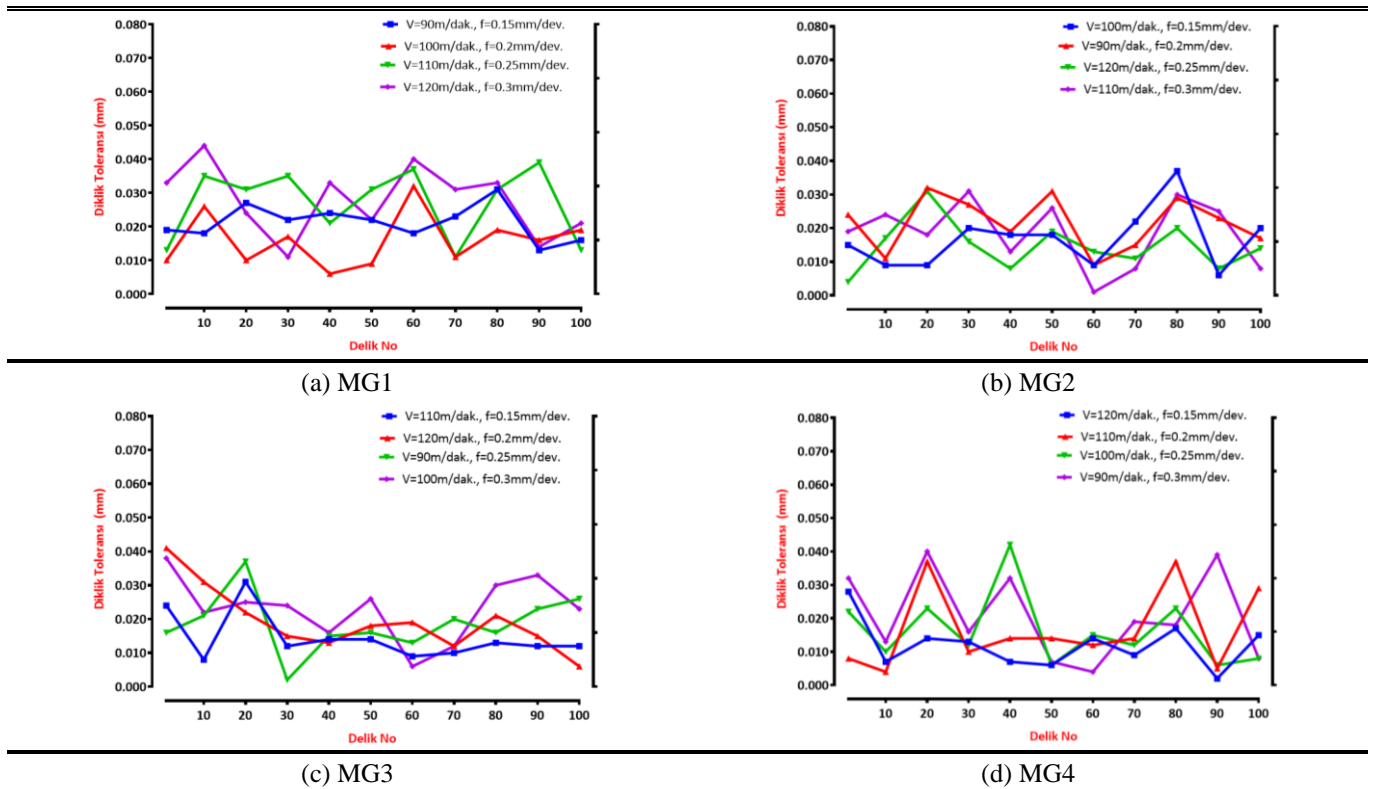


(d) MG4

Şekil 10. Kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak dairesellik toleransı değerlerindeki değişim  
(The change in the deviation from circularity values, depending on the change in cutting parameters)



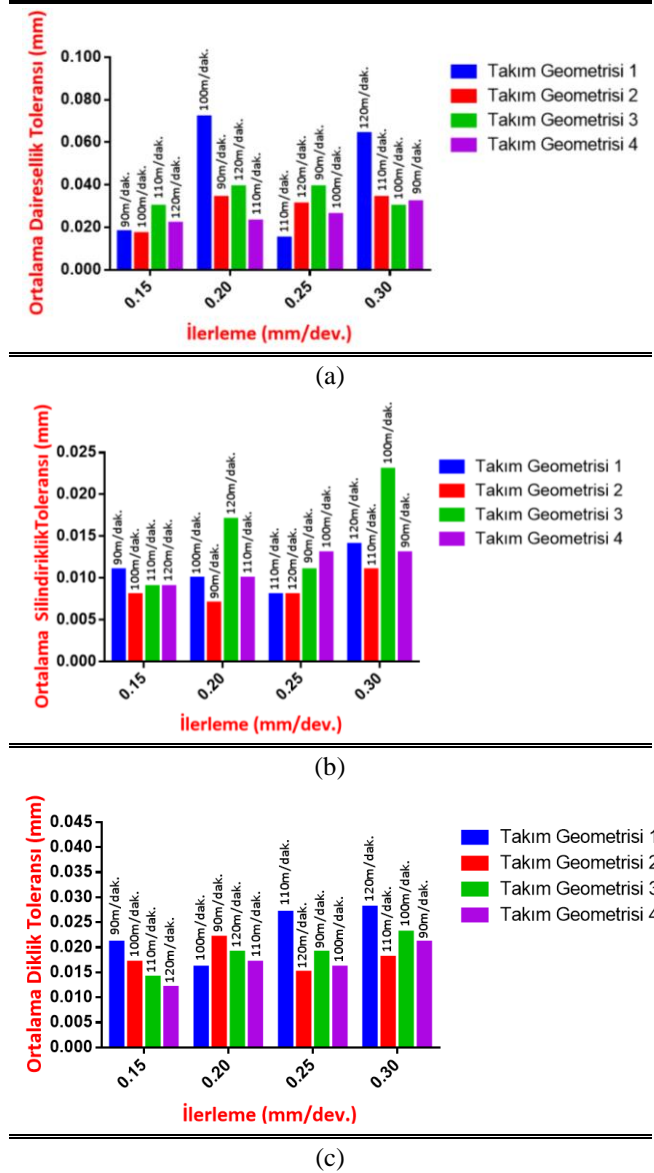
Şekil 11. Kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak silindiriklik toleransı değerlerindeki değişim  
(The change in the deviation from cylindricality values, depending on the change in cutting parameters)



Şekil 12. Kesme parametrelerindeki değişime bağlı olarak diklik toleransı değerlerindeki değişim  
(The change in the deviation from perpendicularity values, depending on the change in cutting parameters)

### 3.3.2. Ortalama geometrik toleranstan sapmaların, kesme hızı, ilerleme ve takım geometrisine göre değerlendirilmesi (Evaluation of average geometric tolerance deviation according to cutting speed, feed rate and tool geometry)

GGG50 malzemesinin delinmesinde, ortalama dairesellik, silindiriklik ve diklik toleransı verilerinin, takım geometrisi, ilerleme ve kesme hızına göre değişimi Şekil 13'deki grafiklerde verilmiştir.



Şekil 13. a) Kesme parametreleri ve takım geometrisine göre; a) Ortalama dairesellik toleransı, b) Ortalama silindiriklik toleransı c) Ortalama diklik toleransı değerlerinin değişimi (According to cutting parameters and tool geometry; change in average circularity, cylindricality and perpendicularity tolerance values)

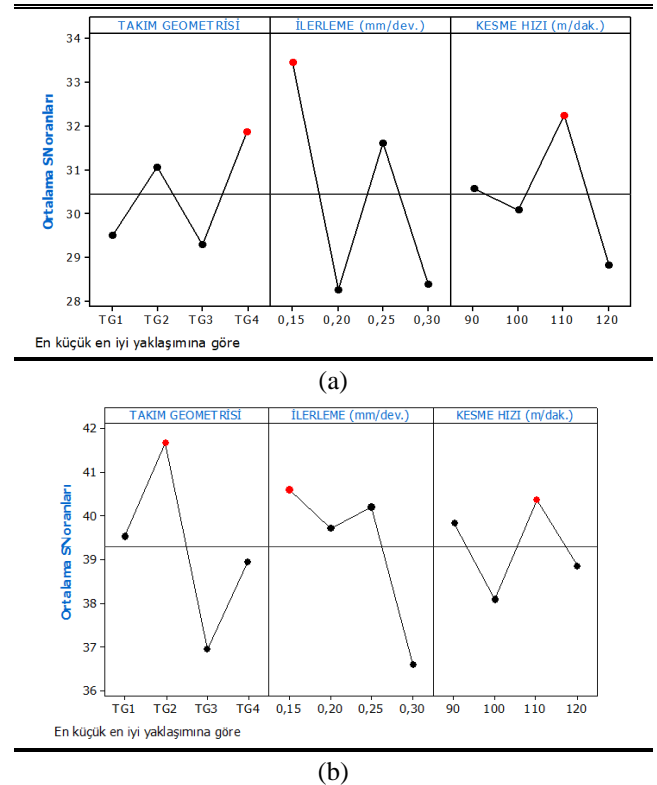
Genel anlamda Şekil 13'de gösterilen grafik incelendiğinde; dairesellik toleransı, silindiriklik toleransı ve diklik toleransı değerlerinin

dağılımında kesme şartlarının (ilerleme, kesme hızı) çok fazla etkisi olduğu görülmektedir.

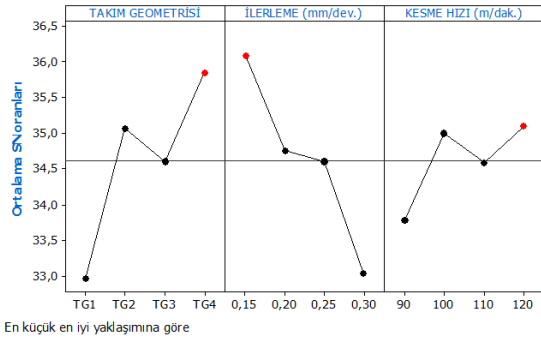
Grafikte en düşük dairesellik toleransı değeri olan 0,015 mm ve en yüksek dairesellik toleransı değeri olan 0,072 mm de MG1 ile elde edilmiştir. GGG50 malzemesine yönelik dört farklı matkap geometrisi için kullanılan tüm kesme şartlarında (ilerleme, kesme hızı) takım geometrisinin de sonuçlar üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. En yüksek silindiriklik toleransı değeri 0,023 mm, MG3 ile elde edilirken, en düşük silindiriklik toleransı değeri 0,007 mm, MG2 ile elde edilmiştir. En yüksek diklik toleransı değeri 0,028 mm, MG1 ile elde edilirken, en düşük diklikten sapma değeri 0,012 mm, MG4 ile elde edilmiştir.

### 3.3.2. Sinyal/Gürültü (S/N) analizine göre ortalama geometrik sapmaların değerlendirilmesi (Evaluation of average geometric tolerance deviation according to (S/N) analysis)

Geometrik sapmaların en düşük olduğu seviyeler en iyi seviyeler olarak Taguchi Sinyal-Gürültü analizinde "en küçük en iyidir" yaklaşımıyla değerlendirilmiş ve sonuçlar **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'deki grafiklerde gösterilmiştir.



(b)



(c)

Şekil 14. a) Dairesellik toleransı için (mm) ortalama S/N oranı grafiği b) Silindiriklik toleransı (mm) ortalama S/N oranı grafiği c) Diklik toleransı için (mm) ortalama S/N oranı grafiği (Mean S/N ratio graph for the deviation from circularity, cylindricity and perpendicularity)

Dairesellik toleransı için yapılan optimizasyonda ise **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**-a'den yararlanarak uygun kesme parametreleri "A4B1C3" olarak belirlenmiştir. MG4, ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 110 m/dak. kombinasyonunun en iyi sonuçları sergilediği görülmektedir.

Silindiriklik toleransı için yapılan optimizasyonda ise **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**-b'den yararlanarak uygun kesme parametreleri "A2B1C3" olarak belirlenmiştir. MG2, ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 110 m/dak. kombinasyonu ile en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Diklik toleransı için yapılan optimizasyonda ise **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**-c'den yararlanarak uygun kesme parametreleri "A4B1C4" olarak belirlenmiştir. MG4, ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 120 m/dak. kombinasyonunun optimum sonucu verdiği söylenebilir.

### 3.4. Delme işleminde girdi parametrelerinin performans çıktıları üzerine etkisinin anova analizi ile değerlendirilmesi (Evaluation of the effect of input parameters on performance outcomes in drilling by anova analysis)

Yapılan deneysel çalışmada, ilerleme kuvveti, moment, yüzey pürüzlülüğü, dairesellik toleransı, silindiriklik toleransı ve diklik toleransı değerlerine etkisi olabileceği düşünülen birden fazla parametre kullanılmıştır. Bu parametrelerin her birinin birden fazla seviyesi vardır. Bu durumda, elde edilen değerler için, deneysel çalışmada kullanılan değişkenlerin etki oranlarının saptanması oldukça önemlidir. Böylece deneysel çalışma sonuçları daha iyi anlaşılabilir ve

yorumlanabilir. İlerleme kuvveti, moment, giriş ve çıkış yüzey pürüzlülükleri, dairesellik toleransı, silindiriklik toleransı, diklik toleransı ortalama değerleri Minitab yazılımında anova analizi yapılarak değerlendirilmiştir.

Anova analizi sonuçları incelendiğinde; ilerleme kuvveti sonuçları üzerindeki en etkili parametrelerin sırasıyla; %50,5 ile ilerleme, %47,7 ile takım geometrisi ve %1,2 ile kesme hızı olduğu, moment sonuçları üzerindeki en etkili parametrelerin sırasıyla; %72,1 ile ilerleme, %26,3 ile takım geometrisi ve %0,2 ile kesme hızı olduğu, giriş yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerindeki en etkili parametrelerin sırasıyla; %65,3 ile kesme hızı, %19,8 ile takım geometrisi ve %0,8 ile ilerleme olduğu, çıkış yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerindeki en etkili parametrelerin sırasıyla; %57,3 ile kesme hızı, %18,4 ile takım geometrisi ve %2,2 ile ilerleme olduğu, dairesellikten sapma sonuçları üzerindeki en etkili parametrelerin sırasıyla; %37,2 ile ilerleme, %11,5 ile kesme hızı ve %8,8 ile takım geometrisi olduğu, silindiriklikten sapma sonuçları üzerindeki en etkili parametrelerin sırasıyla; %40,1 ile takım geometrisi, %35,6 ile ilerleme ve %10,8 ile kesme hızı olduğu, diklikten sapma sonuçları üzerindeki en etkili parametrelerin sırasıyla; %31,8 ile ilerleme, %30,1 ile takım geometrisi ve %7,4 ile kesme hızı olduğu bulunmuştur.

Genel anlamda anova analizi değerlendirildiğinde; silindiriklik toleransı için en etkili parametrenin takım geometrisi, ilerleme kuvveti, moment, dairesellik toleransı ve diklik toleransı için en etkili parametrenin ilerleme, giriş ve çıkış yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin kesme hızı olduğu söylenebilir.

## 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Elde edilen veriler ışığında; her bir matkap geometrisinde ilerleme arttıkça ilerleme kuvveti ve momentin de arttığı, kesme hızının artması ile yüzey pürüzlülüklerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak, ilerlemenin artması ile bazı takımlarda yüzey pürüzlülüğünün azaldığı, bazılarında arttığı görülmüştür. Uç açısının arttığı durumlarda, moment değerlerinde azalmalar gözlemlendiği, öz kalınlıklarının artmasıyla itme kuvvetinin de arttığı belirlenmiştir. Taguchi Sinyal-Gürültü (S/N) analizinde "en küçük en iyidir" yaklaşımıyla

değerlendirilen sonuçlara göre en uygun kesme parametreleri:

- ✓ Moment optimizasyonunda; MG 2, ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 90 m/dak.,
- ✓ İlerleme kuvveti optimizasyonunda; MG 4, ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 120 m/dak.,
- ✓ Giriş tarafındaki yüzey pürüzlülüğü optimizasyonunda; MG 4, İlerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 110 m/dak.,
- ✓ Çıkış tarafındaki yüzey pürüzlülüğü için yapılan optimizasyonda; MG 4, ilerleme oranı 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 110 m/dak.,
- ✓ Dairesellik toleransı için yapılan optimizasyonda; MG 4, ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 110 m/dak.,
- ✓ Silindiriklik toleransı için yapılan optimizasyonda; MG 2, ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 110 m/dak.,
- ✓ Diklik toleransı için yapılan optimizasyonda ise; MG 4, ilerleme 0,15 mm/dev. ve kesme hızı 120 m/dak.,

uygulanabilir parametreler olarak belirlenmiştir. Anova analizine göre; silindiriklik toleransı için en etkili parametrenin takım geometrisi, ilerleme kuvveti, moment, dairesellik toleransı ve diklik toleransı için en etkili parametrenin ilerleme, giriş ve çıkış yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametrenin kesme hızı olduğu söylenebilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı “TÜBİTAK 1501- Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı” kapsamında “3130691” no’lu proje ile destekleyen TÜBİTAK-TEYDEB’e teşekkür ederiz.

## KAYNAKÇA



- [1] Q. Zhang, “A Study of high performance twist drill design and the associated predictive force models”, *PhD. Thesis*, The University of New South Wales Mechanical and Manufacturing Engineering, Australia, 2007.
- [2] J. Zhu, “Machining Feature based geometric modeling of twist drills”, *M. Sc.*

*Thesis*, Concordia University Mechanical & Industrial Engineering, Applied Science (Mechanical Engineering), Canada, 2011.

- [3] W.D. Tsai, S.M. Wu, “A Mathematical Model for Drill Point Design and Grinding”. *Journal of Engineering for Industry*, 101, 333-340, 1979.
- [4] E. Abele, M. Fajara, “Simulation-based twist drill design and geometry optimization”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1), 145-150, 2010.
- [5] S. Fujii, M. F. Devries, and S. M. Wu, "An Analysis of Drill Geometry for Optimum Drill Design by Computer ", *Journal Of Engineering for Industry*, 70(5), 1970.-----
- [6] S. Fujii, M.F. Devries and S.M. Wu, “Analysis of the chisel edge and the effect of the d-theta relationship on drill point geometry”, *ASME Journal of Engineering for Industry*, 93, 1093-1105, 1971.
- [7] W.D. Tsai, S.M. Wu, “Computer Analysis of drill point geometry international”, *Journal of Machine Tools and Manufacture*, 19, 95-108, 1979.
- [8] A. Thangaraj, P. Wright and M. Nissle, “New experiments on the temperature distribution in drilling”, *Journal of Engineering Materials and Technology*, 106(3), 242-247, 1984.
- [9] W. C. Chen, K. H. Fuh, C. F. Wu and B. R. Chang, “Design optimization of a split-point drill by force analysis”, *Journal of Materials Processing Technology*, 58(2-3), 314-322, 1996.
- [10] K. Ren, J. Ni, “Analyses of drill flute and cutting angles”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 15, 546-553, 1999.
- [11] H. Hocheng, C.C. Tsao, “Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits”, *Journal of Materials Processing Technology*, 335–339, 2003.



- [12] J. A. Degenhardt, R. E. DeVor and S. G. Kapoor, "Generalized groove-type chip breaker effects on drilling for different drill diameters and flute shapes". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(14), 1588-1597, 2005.
- [13] J. F. Hsieh, "Mathematical model for helical drill point". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(7), 967-977, 2005.
- [14] J. Jung, R. Mayor and J. Ni, "Development of freeform grinding methods for complex drill flank surfaces and cutting edge contours", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(1), 93-103, 2005.
- [15] A. Paul, S. G. Kapoor and R. E. DeVor, "Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design". *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4), 421-431, 2005.
- [16] M. Pirtini, I. Lazoglu, "Forces and hole quality in drilling", *International Journal Of Machine Tools and Manufacture*, 45(11), 1271-1281, 2005.
- [17] H. Hocheng, C. C. Tsao, "Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(12), 1403-1416, 2006.
- [18] A. Vijayaraghavan, "Automated drill design software", *Berkeley: University of California*, 2006.
- [19] A. Vijayaraghavan, D. Dornfeld, "Automated Drill Modeling for Drilling Process Simulation", *Laboratory for Manufacturing and Sustainability*, (2006).
- [20] J. Audy, "A study of computer-assisted analysis of effects of drill geometry and surface coating on forces and power in drilling", *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1), 130-138, 2008.
- [21] C. C. Tsao, "Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills", *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1), 405-411, 2008.
- [22] J. Wang, Q. Zhang, "A study of high-performance plane rake faced twist drills, Part I: Geometrical analysis and experimental investigation", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(11), 1276-1285, 2008.
- [23] K. Sambhav, S. G. Dhande, P. Tandon, "CAD based mechanistic modeling of forces for generic drill point geometry", *Computer-Aided Design and Applications*, 7(6), 809-819, 2010.
- [24] E. M. A. Satoshi, "Effects of twist drill point geometry on torque and thrust", *Natural Science*, 36-165, 2012.
- [25] M. Yavuz, H. Gökçe, U. Şeker, "Matkap geometrisinin takım aşınması ve talaş oluşumu üzerine etkisinin araştırılması", *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(1), 1-8, 2017.
- [26] E. Güneş, Ç. Demirel, G. Toprak, M. Çetin, F. Gül, "GGG50 Malzemenin Abrasif Aşınma Davranışına Borlamanın Etkisi", *6th International Advanced Technologies Symposium*, 2011.
- [27] B. Kılınc, "GGG 50 Sınıfı Dökme Demire Bakır İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi", *Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi*, 2009.
- [28] M.B. Lazar, "Cutting force modelling for drilling of fiber-reinforced composites", *in à la faculté des sciences et techniques de l'ingénieur. PhD. Thesis, École Polytechnique Fédérale De Lausanne*, 2012.
- [29] U. Şeker, "Kesici takım tasarımı ders notları", *Ankara: Gazi Üniversitesi*, 2008.
- [30] S. Yağmur, "Delik Delme işlemlerinde kesme parametrelerine bağlı olarak oluşan sıcaklığın deneysel olarak incelenmesi", *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2011.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 10.05.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 15.08.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.311585	

## Bir transformatör işletmesinde montaj ünitesinin ergonomik analizi

Demet Gönen\*<sup>1</sup>, Ali Oral<sup>2</sup>, M.A. Beyazıt Ocaktan<sup>1</sup>, Aslan Deniz Karaoğlan<sup>1</sup>, Abdullah Cicibaş<sup>3</sup>

### ÖZ

Montaj hatlarında tekrarlayan işler ve uygun olmayan pozisyonlarda yapılan çalışmalar kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına (KİSR) ve işgücü kayıplarına sebep olmaktadır. KİSR'nin önüne geçmek için montaj hatlarının ergonomik tasarımı önemlidir. Montaj işlemlerinin farklı çalışma pozisyonlarını bir arada kullanılmasını gerektirmesine karşın; tüm çalışma pozisyonlarında aynı anda ergonomik çalışmayı sağlayacak bir hat tasarlamak her zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle montaj hattı tasarımlarında tasarım kriterlerinin belirlenebilmesi için, çalışanların hangi vücut bölümlerinin öncelikli olarak göz önüne alınacağı araştırılması gerekir. Bu çalışmada, bir transformatör imalatçısının montaj hattı çalışanlarının kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları; Cornell Üniversitesi Kas İskelet Sistemi Rahatsızlık Anketinden (CMDQ) esinlenilerek oluşturulan bir anket çalışması, Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme (REBA) Yöntemi ve Ovako Çalışma Duruşu Analiz Sistemi (OWAS) ile analiz edilmiştir. Analiz sonucunda, sırt, bel, ayaklar, boyun, sağ pazu ve omuzlar en riskli vücut bölümleri olarak belirlenmiş ve bu riskleri azaltmak üzere ayarlanabilir bir montaj sehpası tasarımı yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Cornell üniversitesi kas iskelet sistemi rahatsızlık anketi, reba, owas, montaj sehpası tasarımı

## Ergonomic analysis of assembly unit in a transformer company

### ABSTRACT

In assembly lines repeated work and unsuitable working postures cause musculoskeletal disorders (MSD) and labor losses. Ergonomic design of assembly lines is important to avoid MSD. Although assembly work require the use of different working postures together, it is not always possible to design an assembly line that provides ergonomic work in all postures at the same time. For this reason, in order to determine design criteria for design of assembly lines, it is necessary to investigate which body parts of employees will be taken into consideration primarily. In this study, musculoskeletal disorders of assembly line employees of a transformer producer were analyzed by using the questionnaire study inspired by "Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire (CMDQ)", Rapid Entire Body Assessment (REBA) and Ovako Working Postures Analysing System (OWAS). As a result of analysis, the back, waist, feet, neck, right upper arm and shoulders were identified as the most risky body parts and an adjustable assembly table was designed to reduce these risks.

**Keywords:** Cornell musculoskeletal discomfort questionnaire (CMDQ), rapid entire body assessment (REBA), ovako working postures analyzing system (OWAS), assembly table design.

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, Türkiye

<sup>2</sup> Balıkesir Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Türkiye

<sup>3</sup> Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri (BEST) A.Ş., Türkiye

## 1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

İş ile ilgili kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları (KİSR), dünyada yaygın bir sağlık sorunu olup; sinirleri, tendonları, kasları ve vücudun destekleyici yapılarını kapsamaktadır. Tekrarlı hareketler, mola vermeden uzun süre çalışma, vücut pozisyonu, işin hızı, çalışma ortamının ısısı, titreşim, iş organizasyonunun yetersizliği, yüksek iş talebi, iş üzerindeki kontrolün azlığı, düşük iş memnuniyeti, stres, fiziksel kapasite, yaş gibi faktörler kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına sebep olmaktadır [1,2]. Bu rahatsızlıklar, özellikle emek yoğun çalışılan montaj işlerinde sıklıkla görülmektedir. Montaj hatları eğilme, uzanma ve çömelme gibi pek çok uygun olmayan duruş pozisyonları ile tekrarlı hareketlerin bir veya bir kaçının bir arada gözleendiği ergonomik olmayan çalışma pozisyonları içermekte ve buna bağlı ortaya çıkan KİSR iş sağlığı ve güvenliğini olumsuz etkilerken, iş verimini de düşürmektedir. Bunun önüne geçilebilmesi amacıyla montaj hatlarında ergonomik iyileştirmeler yapılması, bu işin doğasından kaynaklanan tehlikeleri ve riskleri azaltacak, bunun yanında verimliliği arttıracaktır.

Montaj hatlarının ergonomik olarak iyileştirilmesi farklı yaklaşımlar kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bunlardan birincisi, montaj hattında gerçekleştirilen operasyonlara ait iş çizelgeleri hazırlanırken ergonomik risk faktörlerinin de getirdiği kısıtların dikkate alınmasıdır (örneğin belirli maruziyet sınırlarına göre görevlendirilebilecek maksimum süreler v.b gibi). Bir diğer yaklaşım ise anketler yoluyla birebir görüşme ile kişilerin KİSR'nın belirlenmesidir. Veri toplamada ankette olduğu gibi birebir görüşme yerine; REBA, OWAS v.b. yöntemler ile de veri toplama ve analiz yapılabilir. Bu analizlerin ardından montaj hattının fiziksel olarak iyileştirilmesi gerekebilir. Literatürde montaj hatlarının ergonomik kısıtlar ve/veya risk faktörleri dikkate alınarak iyileştirilmesi konusunda öne çıkan sınırlı sayıda çalışmalardan biri Kara vd. [3] tarafından önerilen ve montaj hattı dengeleme problemlerinde kaynak kısıtlarının yanında ergonomik kısıtlarında dikkate alındığı modellerdir. Önerilen model ile genel maliyetlerin en aza indirilerek, hattaki çalışma koşullarının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada ergonomik faktörler dikkate alınarak montaj hatlarının dengelenmesi ile verimliliğin arttırılması, meslek hastalıkları için risklerin azaltılması ve kalitenin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ayan [4] çalışmasında, volan

montaj istasyonunu ergonomik açıdan değerlendirmiş, REBA ve MURI metotları ile gerçekleştirilen analizler sonucunda çalışma duruşlarının iyileştirilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Montaj sırasında çalışanı zorlayan ekipmanın yerine hareket kabiliyeti yüksek ve fiziksel zorlanmaya sebep olmayan bir araçla gerçekleştirilmesini önermiştir. Otto ve Scholl [5], işlerin çalışanlara atanmasında ergonomik risklerini azaltmak için montaj hattı dengeleme çalışmalarının etkili olacağından bahsetmişler ve bir otomotiv firmasında yapılan uygulama ile ergonomik risklerin önemli ölçüde azaldığını ortaya koymuşlardır. Gönen vd. [6] çalışmalarında, ot toplama tırnığının montaj işlemleri esnasında karşılaşılan kötü duruş pozisyonlarının iyileştirilmesi için bilgisayar destekli ergonomik analizler yapmışlar, analiz sonuçlarına göre montaj ünitesini ergonomik hale getirebilmek için tasarımda değişiklikler gerçekleştirmişlerdir. Değişikliklerin uygulanması ile çalışan performansında artma ve üretim süresinde yaklaşık %60'lık bir azalma elde edilmiştir. Battini vd. [7] çalışmalarında, iş yerinin ergonomik optimizasyonu ile montaj sistemi tasarımı için kavramsal bir çerçeve oluşturmayı amaçlamışlardır. Bir endüstri uygulaması sunulmuş ve teorik çerçeveyi desteklemek için gelişmiş simülasyon yazılımı kullanılmıştır. Çalışmanın sonucunda verimlilikte %15'lik bir iyileşme, operatörler için yorgunluk seviyelerinde ve yaralanmalarda kayda değer bir azalma sağlanmıştır. Özgörmüş [8] gerçekleştirdiği çalışmasında, montaj hattı için işlerin zorluk derecesi, risk derecesi ve monotonluk düzeyi gibi ergonomik faktörlerin eşit dağıtılmasını sağlayacak bir düzenleme önermiştir. Önerilen düzenleme çalışan performansını olumlu etkilediği için iş kazalarının azalmasına, üretimde verimlilik artışına neden olmuştur. Demirkol ve Baykasoğlu [9] montaj hattı tasarımında ergonomik risk faktörlerini de dikkate alan bir yaklaşım önermişlerdir. Baykasoğlu vd. [10] insan faktörünü de dikkate alarak ergonomik montaj hattı dengeleme üzerine çalışmışlardır.

Literatürde montaj hattının ergonomik faktörler dikkate alınarak düzenlenmesi üzerine yapılan çalışmaların yanında, çalışanların kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarını belirlemede kullanılan ve ölçek olarak kabul görmüş anketlerde bulunmaktadır. Yaygın olarak kullanılan bu anketler; İskandinav Kas İskelet Sistemi Anketi (Nordic Musculoskeletal Questionnaire-NMQ), Hollanda Kas İskelet Sistemi Anketi (Dutch

Musculoskeletal Questionnaire-DMQ) ve Cornell Kas İskelet Sistemi Rahatsızlık Anketi (Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire-CMDQ)'dir. Kuorinka vd. [11] tarafından geliştirilen İskandinav Kas İskelet Sistemi Anketi, kas-iskelet sistemi semptomlarının şiddeti ve etkisini değerlendirmek için kullanılan anketlerden biridir. Hildebrandt [12] tarafından geliştirilen Hollanda Kas İskelet Sistemi Anketi ise çalışanların işle ilişkili kas-iskelet risk faktörlerinin ve semptomlarının hızlı bir şekilde ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Hedge vd. [13] tarafından geliştirilen CMDQ ise temel olarak İskandinav Kas İskelet Sistemi Anketine dayanmakta, ancak farklı olarak skor değerlendirme sistemi uygulamaktadır. CMDQ'nun değerlendirilmesinde farklı vücut bölümleri rahatsızlıkları haftalık bazda frekans, şiddet ve işi yapma kabiliyetine etkisi açısından ele alınmakta ve ağırlıklandırılmış frekans, şiddet ve işi yapma kabiliyetine etkisi skorlarının çarpılmasıyla vücut bölümlerinin riskleri değerlendirilmektedir. Bu anket, montaj hattı vb. gibi tekrarlı hareketlerin yapıldığı farklı çalışmalarda, KİSR'nı belirlemek üzere sıklıkla kullanılmıştır.

Bu çalışmada montaj hattı çalışanlarının yaşamakta olduğu KİSR'nı tespit etmek amacıyla veri toplama aracı olarak Cornell Üniversitesi tarafından geliştirilen ve çalışmamızın amaçlarına uygun olarak uyarlanan CMDQ kullanılmış ve istatistiksel analizlerle öncelikli vücut bölümleri belirlenmiştir. CMDQ'da "Eğer ağrı, sızı, rahatsızlık hissettiyseniz, bu rahatsızlık işi yapma kabiliyetinize engel oldu mu?" sorusu, bu çalışmada "Eğer böyle bir deneyiminiz olduysa bu rahatsızlığın yaptığınız işle ilgisini derecelendiriniz" olarak değiştirilmiştir. Amaç, rahatsızlık frekansı, şiddeti ve şikayetlerin işle ilgi derecelerine göre hangi vücut bölümlerinin risk altında bulunduğunun hesaplanabilmesidir.

İşyerlerinde kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına neden olabilecek riskleri azaltmak, hatta ortadan kaldırmak için anketlerin kullanımının yanı sıra; riskleri kayıt altına alarak, nicel değerlendirmeler yapan gözleme dayalı tekniklerden de (RULA, REBA, OWAS vb.) yararlanılabilir [14]. RULA (Rapid Upper Limb Assessment), iş için gerekli

olan gücü ve tekrarlı hareketleri dikkate alarak üst uzuv (el-bilek-dirsek-alt kol-üst kol-omuz-boyun) rahatsızlıklarını; REBA (Rapid Entire Body Assessment) ise dinamik ve statik duruşlardaki yüklenme ile işgörenin tüm vücudunun duruşsal riskini değerlendirmek amacıyla geliştirilmiş bir yöntemdir. REBA yöntemi, RULA yönteminden türetilmiştir. Ancak, RULA yöntemine göre üstünlüğü tüm vücudu dikkate aldığı için değerlendirmeye sırt, bacak ve dizleri de dahil etmesidir. OWAS (Ovako Working Analysis System), çalışanın kas-iskelet sistemindeki yüklenmeyi ve sistemin neden olduğu kötü duruşları belirlemeye yarayan bir tekniktir [2].


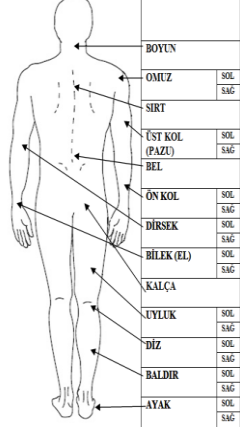
Literatürde; CMDQ, REBA ve OWAS yöntemlerini birlikte değerlendiren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak, elektromekanik sanayinde faaliyet gösteren bir transformatör üreticisinin montaj hattında gözlenen KİSR'nın nedenlerini belirlemek amacıyla CMDQ, çalışmanın amacına uygun olacak şekilde uyarlanarak veri toplanmış ve analiz edilmiş; analiz sonuçlarının doğruluğu nicel değerlendirmeler yapan gözleme dayalı teknikler (REBA, OWAS) ile karşılaştırılmıştır. İstatistiksel ve gözleme dayalı analizler sonucunda belirlenen öncelikli vücut bölümleri dikkate alınarak, uygunsuz duruş pozisyonlarını en aza indirecek ergonomik bir montaj sehpası tasarımı gerçekleştirilmiştir.

## 2. METOT (METHOD)

Bu çalışmada elektromekanik sanayinde faaliyet gösteren bir transformatör imalatçısının montaj bölümünde çalışanlarının kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları; REBA, OWAS ve probleme uygun şekilde uyarlanmış CMDQ ile analiz edilmiştir.

### 2.1 Uyarlanmış Cornell Kas İskelet Sistemi Rahatsızlık Anketi (Adapted Cornell Musculoskeletal Discomfort Questionnaire)

CMDQ, kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının belirlenmesi için kullanılan iyi tasarlanmış bir veri toplama aracıdır.

	A BÖLGESİ (Koyu Renkli Bölge)	SOL		BOYUN		<p>Geçtiğimiz hafta içinde Belirtilen vücut bölgesi ile ilgili hangi sıklıkla acı, ağrı veya rahatsızlık deneyiminiz oldu?</p> <p>(İlgili kutuya (X) işareti koyarak belirtiniz)</p>	<p>Eğer böyle bir deneyiminiz olduysa, bu rahatsızlığınızı derecelendiriniz:</p> <p>(İlgili kutuya (X) işareti koyarak belirtiniz)</p>	<p>Eğer böyle bir deneyiminiz olduysa bu rahatsızlığın yaptığımız işle ilgisini derecelendiriniz:</p> <p>(İlgili kutuya (X) işareti koyarak belirtiniz)</p>						
		SAG		OMUZ	SOL									
		SAG		SIRT	SAG									
	B BÖLGESİ (Koyu Renkli Bölge)	SOL		ÜST KOL (PAZE)	SOL									
		SAG		BEL	SAG									
	C BÖLGESİ (Koyu Renkli Bölge)	SOL		ÖN KOL	SOL									
	SAG	DİRSEK		SAG										
D BÖLGESİ (Koyu Renkli Bölge)	SOL	BİLEK (EL)		SOL										
	SAG	KALÇA		SAG										
E BÖLGESİ (Koyu Renkli Bölge)	SOL	UYLUK		SOL										
	SAG	DİZ		SAG										
F BÖLGESİ (Koyu Renkli Bölge)	SOL	BALDIR		SOL										
	SAG	AYAK	SAG											
				Puan										
				1	2	3	4	5	Puan					
				Hiç olmadı	1-2 Defa	3-4 Defa	Günde 1 defa	Günde bir kaç defa	Az	Orta	Fazla	Az	Orta	Fazla

Şekil 1.Uyarlanmış Cornell Kas İskelet Rahatsızlıkları Anketi (Adapted Cornell musculoskeletal discomfort questionnaire)

CMDQ, tekrarlı hareketlerin yapıldığı çalışmalarda KİSR belirlemek üzere farklı pek çok sektörde uygulanmıştır [13,15,16]. Anket, çalışmamıza uyarlanmış olarak Şekil 1’de verilmiştir.

CMDQ’da anketin 3. bölümünde rahatsızlıkların “iş yapma kabiliyetine etkisi” hakkında bilgi toplanmaktadır. İş verimliliği değerlendirmesinde rahatsızlıkların yapılan işi yapma kabiliyetine etki derecesi önemli iken, montaj hattı tasarımı için rahatsızlıkların ne derecede yapılan işten kaynaklandığı önemlidir. Ayrıca, rahatsızlığın iş ortamından mı yoksa başka sebeplerden mi kaynaklandığının tespiti orijinal ankette daha zor olmaktadır. Bu çalışmada temel amaç ergonomik hat tasarımı olduğu için anket çalışmanın amacına uygun şekilde, rahatsızlıkların “iş yapma kabiliyetine etkisi” ifadesi yerine “işle ilgisi” şeklinde değiştirilmiştir.

CMDQ, analiz için 4 farklı değerlendirme yöntemi önerir. Bunlar, kişi başına belirti sayısı; her bir kişi için derecelendirme değeri toplamı; ağırlıklandırılmış skorlar; sıklık, frekans ve işle ilgisi ağırlıklı skorlarının çarpılmasına dayalı analizlerdir. Bu çalışmada montaj bölümünde açığa çıkan en ciddi kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının kolaylıkla tespiti ve en problemlili çalışanların daha kolay belirlenebilmesi için sıklık, frekans ve işle ilgisi ağırlıklı skorlarının çarpıldığı yöntem kullanılmıştır.

Uyarlanmış anket, farklı vücut bölümleri rahatsızlıklarını haftalık bazda frekans, şiddet ve işle ilgisi açısından değerlendirmekte ve bir rahatsızlık skoru hesaplamaktadır. Rahatsızlık skorunu hesaplamada sıklık skorları ağırlıklandırması aşağıda verilmiştir:

- Hiç olmadı=0
- Haftada 1-2 defa=1,5
- Haftada 3-4 defa=3,5
- Günde 1 defa=5
- Günde birkaç defa=10

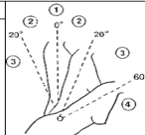
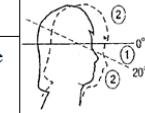
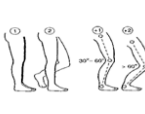
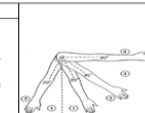
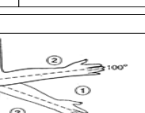
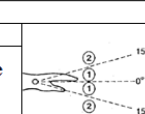
Rahatsızlık ile ilgili şiddet skorları ise az=1, orta=2 ve fazla=3; rahatsızlığın işle ilgisi skoru az=1, orta=2, fazla=3 şeklinde ağırlıklandırılmaktadır. İlgili vücut bölümünün toplam rahatsızlık skoru sıklık, şiddet, rahatsızlığın işle ilgisi (sıklık x şiddet x rahatsızlığın işle ilgisi) skorlarının çarpımıyla bulunmaktadır [17].

Ankette değerlendirilen tüm vücut bölümlerinin toplam skoruna oranla en yüksek yüzde skora sahip bölümler, en ciddi probleme sahip vücut bölümlerini belirlemede kullanılmaktadır.

## 2.2 Hızlı Tüm Vücut Değerlendirme (REBA) Yöntemi (Rapid Entire Body Assessment)

REBA, dinamik ve statik duruşlarda yüklenmeyi ve insan-yük etkileşimini göz önüne alarak çalışanın tüm vücudunun duruşsal riskini değerlendirmeye olanak tanıyan ve bu alanda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir [18-19].

REBA yöntemi, çalışma duruşu esnasında gövdede, boyunda, bacaklarda, üst-alt kollarda, bileklerde ortaya çıkan zorlanmaları belirler ve analiz edilmek istenilen bir çalışma duruşu veya hareketin neden olduğu riski sayısal olarak ifade eder. REBA duruş puanlama esasları Şekil 2’de verilmiştir.

Gövde			
Hareket	Skor	Skor Değişimi	
Dik	1	Yana esneme veya dönme varsa +1	
0°-20° Fleksiyon 0°-20° Ekstansiyon	2		
20°-60° Fleksiyon >20° Ekstansiyon	3		
>60° Fleksiyon	4		
Boyun			
Hareket	Skor	Skor Değişimi	
0°-20° Fleksiyon	1	Yana esneme veya dönme varsa +1	
>20° Fleksiyon veya Ekstansiyon	2		
Bacaklar			
Hareket	Skor	Skor Değişimi	
Bilateral (iki taraflı) ağırlık taşıma, yürütme veya oturma	1	Diz(ler)de 30°-60° arası fleksiyon +1	
Unilateral (tek taraflı) ağırlık taşıma veya sabit olmayan duruş	2	Diz(ler)de >60° arası fleksiyon (oturma hariç) +2	
Üst kollar			
Hareket	Skor	Skor Değişimi	
20° Fleksiyon-20° Ekstansiyon	1	Kolda: -Abdüksiyon varsa -Rotasyon varsa +1	
20°-45° Fleksiyon >20° Ekstansiyon	2	Omuz yükselmişse +1	
45°-90° Fleksiyon	3	Kolun duruşunda yerçekimi desteği etkili ise -1	
>90° Fleksiyon	4		
Alt kollar			
Hareket	Skor	Skor Değişimi	
60°-100° Fleksiyon	1		
<60° Fleksiyon veya >100° Fleksiyon	2		
Bilek			
Hareket	Skor	Skor Değişimi	
0°-15° Fleksiyon veya Ekstansiyon	1	Yana esneme veya dönme varsa +1	
>20° Fleksiyon veya Ekstansiyon	2		

Şekil 2. REBA duruş puanlaması (REBA posture score) [18]

REBA yönteminde risk değeri belirlenirken; gövde, boyun, bacaklar A Grubu (Tablo 1) ve üst-alt kollar, bilekler B Grubu (Tablo 2) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Tablo 1. REBA-Tablo A (REBA-Table A)

Gövde	Boyun											
	1				2				3			
	Bacaklar				Bacaklar				Bacaklar			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Tablo 2. REBA-Tablo B (REBA-Table B)

Üst Kol	Alt Kol					
	1			2		
	Bilek			Bilek		
	1	2	3	1	2	3
1	1	2	2	1	2	3
2	1	2	3	2	3	4
3	3	4	5	4	5	5
4	4	5	5	5	6	7
5	6	7	8	7	8	8
6	7	8	8	8	9	9

Gövde, boyun ve bacakların skorları belirlenerek, Tablo A yardımıyla bu skorlara göre yeni bir skor belirlenmekte, aynı şekilde üst-alt kol ve bilekler için skorlar belirlenerek, Tablo B yardımıyla yeni bir skor belirlenmektedir.

Tablo 3. Yük/Kuvvet değerleri (Load/Force values)

Yük/Kuvvet	Skor
< 5 kg	0
5-10 g	1
> 10 kg	2
Ani veya hızlı kuvvet artışı	+1

Tablo A yardımıyla yeniden gövde, boyun ve bacakların skorlarına Tablo 3'te verilen Yük/Kuvvet skoru eklenerek A skoru elde edilmektedir.

Tablo 4. Kavrama değerleri (Grip values)

Derece	Açıklama	Skor
İyi	İyi bir tutma kolu ve orta şiddette kavrama	0
Uygun	El tutuşu uygun fakat ideal değil veya vücudun başka bir bölgesi ile kavrama uygun	1
Kötü	El tutuşu uygun olmamasına rağmen mümkün	2
Uygun değil	Zor ve güvenli olmayan tutuş, tutma kolu yok. Vücudun başka bir bölgesi kullanılarak tutuş uygun değil	3

Tablo B yardımıyla yeniden belirlenen üst-alt kol ve bilekler skorlarına Tablo 4'te verilen kavrama skoru eklenerek B skoru elde edilmektedir [14,18,19]. Tablo C kullanılarak, A ve B skorlarına göre C skoru (Tablo 5) belirlenmektedir.

Tablo 5. REBA – Tablo C (REBA - Table C)

A SKORU	BSKORU											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	2	3	3	4	5	6	7	7	7
2	1	2	2	3	4	4	5	6	6	7	7	7
3	2	3	3	3	4	5	6	7	7	8	8	8
4	3	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9
5	4	4	4	5	6	7	8	8	9	9	9	9
6	6	6	6	7	8	8	9	9	10	10	10	10
7	7	7	7	8	9	9	9	10	10	11	11	11
8	8	8	8	9	10	10	10	10	10	11	11	11
9	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
10	10	10	10	11	11	11	11	12	12	12	12	12
11	11	11	11	11	12	12	12	12	12	12	12	12
12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

Tablo 6. Aktivite Skor Değeri(Activity score value)

Aktivite	Skor
Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (örnek: 1 dakikadan uzun süre tutma)	+1
Kısa aralıklarla tekrar eden işler (örnek: 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden iş) (yürüme hariç)	+1
Yapılan iş duruşta hızlı ve büyük değişikliğe neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışılıyorsa	+1

Aktivite skorunun (Tablo 6) ilave edilmesiyle de REBA Risk Değeri (Tablo 7) bulunmaktadır.

Tablo 7. Risk Derecelendirmesi (Risk assessment)

Derece	REBA Skoru	Risk Seviyesi	Önlem
0	1	İhmal edilebilir	Gerekli Değil
1	2-3	Düşük	Gerekli Olabilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Kısa Zaman İçerisinde Gerekli
4	11-15	Çok Yüksek	Hemen Gerekli

Belirlenen REBA skoruna göre riski azaltacak önlemlerin alınması gerekmektedir [18].

### 2.3. Ovako Çalışma Duruşu Analiz Sistemi (OWAS) (Ovako Working Analysis System)

Ovako Çalışma Duruşu Analiz Sistemi (OWAS), çalışanın kas-iskelet sistemindeki yüklenmeyi ve sistemin neden olduğu kötü duruşları belirlemeye yarayan gözleme dayalı bir çalışma duruşu analiz yöntemidir. OWAS yöntemi; kötü duruşların ve faaliyetlerin tespit edilmesinde, tekrarlanan işlerin çalışanın ne kadar zorladığının belirlenmesinde, optimal iş metotlarının tahmin edilmesinde, iş yerinin verimlilik, konfor ve mesleki sağlık açısından değerlendirilmesinde ve insan makine ara kesitinin sistematik bir biçimde incelenmesinde kullanılmaktadır [20-22]. Bu yöntemde gözlemler yoluyla sırt, kollar, bacaklar ve eller için kullanılan çalışma duruşları ve maruz kalınan yükün ağırlığı değerlendirilerek çalışan hareketlerinin analizi gerçekleştirilir.

Tablo 8. Duruşlar için kod numaraları (Code numbers for postures)

Sırt duruşu	Kod	Kol duruşu	Kod
Düz (nötral)	1	Her iki kol omuz seviyesinin altında	1
Öne veya arkaya eğilmiş	2	Bir kol omuz seviyesinin üstünde	2
Çevrilmiş veya bir yana eğrilmiş	3	Her iki kol da omuz seviyesinin üstünde	3
Çevrilmiş ve bükülmüş ya da eğilmiş	4		
Yük/Güç kullanımı	Kod	Bacak duruşu	Kod
10 kg'ın altında	1	Oturma	1
10 ile 20 kg arasında	2	Bacaklar düz şekilde iki ayak üzerinde durma	2
20 kg'dan fazla	3	Tek ayak üzerinde dikilme, dizler düz	3
		Dizler bükülmüş, iki bacak üstünde dikilme veya çömelme	4
		Diz bükülmüş şekilde tek ayak üzerinde dikilme veya çömelme	5
		Bir ya da iki diz yere çökmüş	6
		Yürüme veya hareket	7

Tablo 9. OWAS sisteminde duruşlar için eylem sınıfları(Action classes of postures in OWAS)

Bacaklar:							
	1	2	3	4	5	6	7
Kuvvet kullanımı	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
Kollar Sırt	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	3	2	2	3
	2	2	2	3	2	2	3
	3	2	2	3	2	2	3
3	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1
4	1	2	3	3	2	2	3
	2	2	3	4	3	3	4
	3	3	4	4	4	4	4

Tablo 10. OWAS eylem sınıflandırması(Action classification for OWAS)

Kod	Eylem sınıfı	Açıklama
1	Normal duruş	Ergonomik düzenleme gerekli değil
2	Zorlanma fazla değil	Ergonomik düzenleme yakın bir zamanda yapılmalıdır.

OWAS; dört adet sırt duruşu, yedi adet bacak duruşu, üç adet kol duruşu ile kaldırılan yükün ağırlığını değerlendiren, üç yük durumu kombinasyonundan oluşan, toplamda 252 (4x3x7x3) duruş ve yük kombinasyonuna sahiptir. Bu yöntemle göre, çalışanın çalışma esnasındaki sırt, bacak ve kol duruşlarını içeren vücut duruşları ve bu çalışma süresince uyguladığı yük Tablo 8'deki kodlar yardımıyla kayıt altına alınır. Kodlar Tablo 9'a yerleştirilerek OWAS eylem sınıfı belirlenir ve bu değere göre Tablo 10'dan risk düzeyi bulunur. Riskli vücut duruşları belirlenerek bu riskleri önlemek üzere iyileştirme faaliyetleri gerçekleştirilir [14,20-22].

### 3. UYGULAMA (APPLICATION)

Bu çalışma, kuru tip, dağıtım, orta güç ve güç transformatörleri imalatı yapan Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri A.Ş. (BEST A.Ş.)'nin dağıtım transformatörleri montaj hattında gerçekleştirilmiştir. Dağıtım transformatörlerinin üretim süresi güç transformatörleri ile kıyaslandığında belirgin şekilde daha kısa olup; proje bazlı üretim olmasına karşın; seri üretim karakterine sahiptir. Başka bir deyişle, benzer işler ve operasyonlar, nispeten kısa sürede ve yüksek hacimlerde gerçekleştirilmektedir. BEST A.Ş.'de transformatör üretimi 4 ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar çekirdek üretim, sarım, montaj ve son işlemler prosesleridir. Transformatör imalatında, transformatörün tasarımına uygun boyutlarda kesilmiş silisli sacların, belirli bir düzende üst üste dizilmesi ile çekirdek oluşturulmaktadır. Çekirdeğin üzerine sarım operasyonu ile üretimi gerçekleştirilen alçak gerilim ve yüksek gerilim bobinler monte edilerek aktif kısım adı verilen ara ürün elde edilmektedir. Montaj operasyonunda ayrıca üst boyunduruk dizimi, üst kapak montajı, şalter ve izolatör takılması ve fırınlama işlemleri gibi detay proseslerde mevcuttur. Daha sonra son işlemler operasyonu ile montaj sonrası tamamlanan aktif kısmın aksesuar ve tesisat montajının yapılarak kazana indirilmesi, kurusıkım, yağ basma, sızdırmazlık testleri,

3	Yüklenme ve zorlanma fazla	Ergonomik düzenleme mümkün oldukça erken yapılmalıdır
4	Yüklenme ve zorlanma çok fazla	Ergonomik düzenleme derhal yapılmalıdır

klemens kutusu montajı ve sevkiyat öncesi son testlerin yapılması ile transformatör imalat süreçleri tamamlanır. Transformatör üretiminin üretim aşamaları içerisinde özellikle montaj ve son işlemler operasyonu emek yoğun operasyonlardır. Bu operasyonlarda uygun olan/olmayan pek çok farklı pozisyonda tekrarlı hareketler ve uygun olmayan duruş pozisyonlarında uzun süreli çalışmalar yapılmaktadır.

Uygulama yapılan firmanın montaj hattı çalışanlarının kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları, uyarlanmış CMDQ ile analiz edilerek en riskli vücut bölümleri belirlenmiş, bunun yanı sıra çalışma pozisyonuna bağlı olarak gelecekte de gözlenebilecek rahatsızlıkların tespit edilmesi amacıyla REBA ve OWAS teknikleriyle de gözleme dayalı analizler gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1 Montaj Hattının Uyarlanmış Kas İskelet Sistemi Rahatsızlık Anketi ile Analizi (Analysis of the Assembly Line by Adapted Musculoskeletal System Discomfort Questionnaire)

Çalışmada ele alınan transformatör üreticisinin montaj bölümünde 2 vardiyada toplam 38 erkek işçi çalışmaktadır. Anket, montaj bölümünde çalışanların tümüne uygulanmıştır ve işçilerin vücut bölümlerinin rahatsızlık riskleri analiz edilmiştir. Montaj bölümü çalışanlarının % 76'sı en az bir vücut bölümünde rahatsızlık hissettiğini belirtmiştir. Anket yanıtları Tablo 11'de özetlenmiştir [23]. Anket yanıtlarından elde edilen frekans, şiddet ve rahatsızlığın işle ilgili skorları ağırlandırılarak, çarpılmış ve her bir vücut bölümü ile ilgili toplam rahatsızlık skoru elde edilmiştir.

Örneğin boyun ile ilgili rahatsızlık skoru hesaplamasında; Bölüm 2.1 de verilen ağırlıklar kullanılarak ağırlıklandırılmış sıklık skoru  $(23 \times 0) + (9 \times 1,5) + (5 \times 3,5) + (1 \times 5) + (0 \times 10) = 36$ , ağırlıklandırılmış şiddet skoru  $(4 \times 1) + (10 \times 2) + (1 \times 3) = 27$  ve rahatsızlığın ağırlıklandırılmış işle ilgili skoru  $(7 \times 1) + (8 \times 2) + (0 \times 3) = 23$  olarak hesaplanmıştır. Bu üç skor çarpılarak boyun bölgesi ile ilgili toplam rahatsızlık skoru 22356 olarak hesaplanmıştır. İncelenen tüm vücut bölümleriyle ilgili skorlar ve yüzdeleri Tablo 12'de verilmiştir.



Tablo 11. Anket özet yanıtları(Summary of responses in the survey) [23]

Vücut Bölümü	Geçtiğimiz hafta içinde belirtilen vücut bölgesi ile ilgili hangi sıklıkla acı ağrı yada rahatsızlık deneyiminiz oldu?					Eğer böyle bir deneyiminiz olduysa, bu rahatsızlığınızı derecelendirdiniz.			Eğer böyle bir deneyiminiz olduysa, bu rahatsızlığın yaptığımız işle ilgisinin derecelendirdiniz.		
	Hiç olmadı	Haftada 1-2 defa	Haftada 3-4 defa	Günde 1 defa	Günde bir kaç	Az	Orta	Fazla	Az	Orta	Fazla
Boyun	23	9	5	1	0	4	10	1	7	8	0
Omuz (Sol)	27	6	3	2	0	4	5	2	3	7	1
Omuz(Sağ)	27	5	4	1	1	3	8	0	2	8	1
Sırt	20	7	5	4	2	4	13	1	7	11	0
Üst Kol-Pazu (Sol)	31	3	2	2	0	2	5	0	3	4	0
Üst Kol-Pazu (Sağ)	25	8	2	2	1	4	9	0	6	6	1
Bel	23	7	3	3	2	5	8	2	3	10	2
Ön Kol (Sol)	30	3	2	3	0	3	5	0	3	5	0
Ön Kol (Sağ)	29	6	1	1	1	4	5	0	1	6	2
Dirsek (Sol)	32	4	2	0	0	4	2	0	4	2	0
Dirsek (Sağ)	32	5	0	0	1	3	3	0	4	1	1
Bilek El (Sol)	30	5	1	1	1	3	3	2	5	0	3
Bilek El (Sağ)	25	10	1	0	1	4	8	1	6	3	4
Kalça	35	1	1	1	0	0	3	0	2	1	0
Uyluk (Sol)	31	4	1	1	0	2	5	0	3	4	0
Uyluk (Sağ)	31	4	2	1	0	1	6	0	2	5	0
Diz (Sol)	27	8	1	2	0	4	7	0	5	5	1
Diz (Sağ)	30	5	1	2	0	3	5	0	5	2	1
Baldır (Sol)	29	5	2	2	0	4	5	0	4	5	0
Baldır (Sağ)	29	5	2	2	0	4	5	0	4	5	0
Ayak (Sol)	25	4	4	2	3	5	7	1	7	5	1
Ayak (Sağ)	26	4	1	2	5	3	7	2	5	5	2
A Bölgesi (Sol)	35	1	0	1	1	1	2	0	1	1	1
A Bölgesi (Sağ)	31	4	0	1	2	2	5	0	1	4	2
B Bölgesi (Sol)	35	3	0	0	0	2	0	0	3	0	0
B Bölgesi (Sağ)	34	3	0	0	1	1	3	0	2	1	1
C Bölgesi (Sol)	35	2	0	1	0	1	1	0	1	1	1
C Bölgesi (Sağ)	33	3	0	1	1	2	2	0	1	2	2
D Bölgesi (Sol)	36	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1
D Bölgesi (Sağ)	33	2	1	1	1	2	3	0	1	2	2
E Bölgesi (Sol)	33	2	2	1	0	2	2	0	2	2	1
E Bölgesi (Sağ)	30	3	2	1	2	2	5	0	3	3	2
F Bölgesi (Sol)	34	2	1	1	0	1	2	0	1	2	1
F Bölgesi (Sağ)	29	4	2	2	1	1	6	0	2	5	2

Tablodan görüldüğü üzere çalışanların en yüksek rahatsızlık skorları sırasıyla sırt (%19,99), bel (%13,47), sağ ayak (%10,31), sol ayak (%8,11), boyun (%6,87), üst kol sağ pazu (%5,53), sağ bilek (%4,83), sağ omuz (%4,47) ve sol omuz (%3,62) bölgelerinde oluşmaktadır. Geri kalan bölgelerdeki rahatsızlık skorları oldukça düşüktür. Anket ile elde edilen sonuçlarda özellikle sırt, bel, ayaklar, boyun, sağ pazu ve omuzlar en riskli vücut bölümleri olarak tespit edilmiştir. Çalışma pozisyonu gereği ağırlıklı olarak ayakta durma ve eğilme hareketlerine bağlı rahatsızlık skorları fazla iken, el ile yapılan ince işçilik olmaması ve dirseklerin çok kullanılmaması nedeniyle el ve dirsek bölgelerinde genellikle rahatsızlık skorları düşük çıkmıştır. Transformatöre montaj esnasında sıklıkla elle dayanmaya bağlı olarak E ve F bölgelerindeki rahatsızlıklar, diğer el bölgelerine göre daha fazladır. Ayrıca çalışanların ağırlıklı olarak sağ ellerini kullanmaları nedeniyle sol el ve kol bölgelerindeki rahatsızlık skorları nispeten daha düşüktür.

Tablo 12. Toplam rahatsızlık skorları (Total discomfort scores) [23]

Vücut Bölümü	Sıklık	Şiddet	İşle İlgisi	Skor	%
Boyun	36	27	23	22356	<b>6,87</b>
Omuz (Sol)	29,5	20	20	11800	<b>3,62</b>
Omuz(Sağ)	36,5	19	21	14563,5	<b>4,47</b>
Sırt	68	33	29	65076	<b>19,99</b>
Üst Kol-Pazu (Sol)	21,5	12	11	2838	<b>0,87</b>
Üst Kol-Pazu (Sağ)	39	22	21	18018	<b>5,53</b>
Bel	56	27	29	43848	<b>13,47</b>
Ön Kol (Sol)	26,5	13	13	4478,5	1,38
Ön Kol (Sağ)	27,5	14	19	7315	2,25
Dirsek (Sol)	13	8	8	832	0,26
Dirsek (Sağ)	17,5	9	9	1417,5	0,44
Bilek El (Sol)	26	15	14	5460	1,68
Bilek El (Sağ)	28,5	23	24	15732	<b>4,83</b>
Kalça	10	6	4	240	0,07
Uyluk (Sol)	14,5	12	11	1914	0,59
Uyluk (Sağ)	18	13	12	2808	0,86
Diz (Sol)	25,5	18	18	8262	2,54
Diz (Sağ)	21	13	12	3276	1,01
Baldır (Sol)	24,5	14	14	4802	1,47
Baldır (Sağ)	24,5	14	14	4802	1,47
Ayak (Sol)	60	22	20	26400	<b>8,11</b>
Ayak (Sağ)	69,5	23	21	33568,5	<b>10,31</b>
A Bölgesi (Sol)	16,5	5	6	495	0,15
A Bölgesi (Sağ)	31	12	15	5580	1,71
B Bölgesi (Sol)	4,5	2	3	27	0,01
B Bölgesi (Sağ)	14,5	7	7	710,5	0,22
C Bölgesi (Sol)	8	3	6	144	0,04
C Bölgesi (Sağ)	19,5	6	11	1287	0,40
D Bölgesi (Sol)	6,5	3	5	97,5	0,03
D Bölgesi (Sağ)	21,5	8	11	1892	0,58
E Bölgesi (Sol)	15	6	9	810	0,25
E Bölgesi (Sağ)	36,5	12	15	6570	2,02
F Bölgesi (Sol)	11,5	5	8	460	0,14
F Bölgesi (Sağ)	33	13	18	7722	2,37

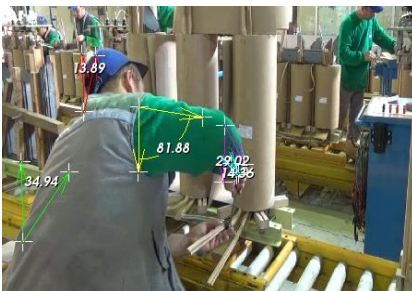
### 3.2 Montaj Hattının REBA ve OWAS Teknikleri ile Analizi (Analysis of Assembly Line with REBA and OWAS Techniques)

Montaj bölümünde çalışan işgören, montaj hattının yüksekliğinin sabit olmasından dolayı oturarak, çömelerek eğilerek vb. uygun olmayan duruş pozisyonlarında çalışmak zorunda kalmaktadır. Şekil 3'te görülen çalışan, alçak gerilim iletken uçlarının izolasyonlarının açılması işlemini gerçekleştirmektedir (Şekil 3.a-b). İzolasyon açma işleminde çalışan 5 kg.'ın altında yük uygulamakta ve bu işlemi ortalama 10 dakikada 6 kere tekrarlamaktadır. Bu pozisyonlarda uzun süreli ve tekrarlı hareketlerle yapılan çalışma uzun vadede KİSR'na sebep olabilmektedir.

Montaj hattı çalışanlarının duruş pozisyonları REBA ve OWAS yöntemleri ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler uMEDergonomy V1.3 yazılımı ile yapılmıştır. uMEDergonomy, mesleki risklerin azaltılması ve iş verimliliğinin artırılması amacı ile ergonomik analizlerin yapılması için geliştirilen, bünyesinde risk değerlendirme yöntemlerini içeren bir mühendislik yazılımıdır [23,24]. REBA analizinde öncelikle boyun, gövde ve bacaklar için nötral duruma göre hareket değerlendirilmiş ve skor değerleri belirlenmiştir (Şekil 4).

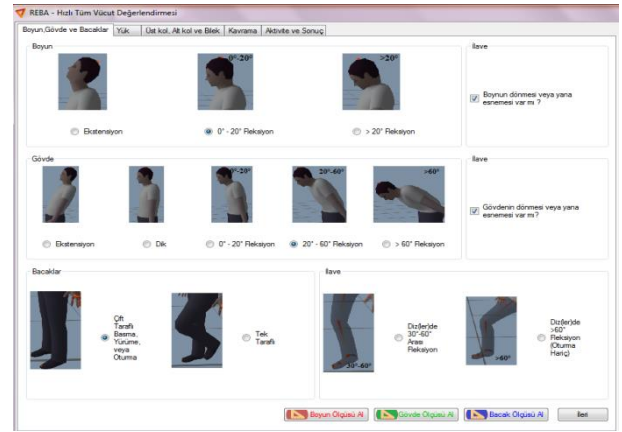


(a)



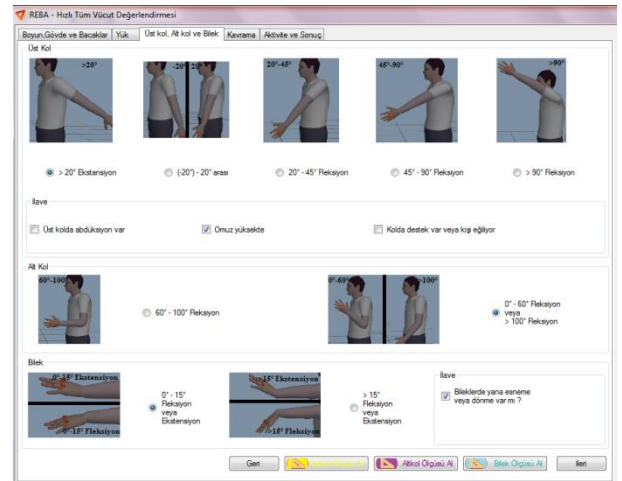
(b)

Şekil 4. Montaj işlemi çalışanın çalışma pozisyonu (Work position of the assembly worker) [23]



Şekil 3. REBA analizinde boyun, gövde ve bacakların değerlendirilmesi (Evaluation of neck, trunk and legs in REBA analysis)

Yük değerinin (5 kg'dan az) eklenmesi ile üstkol, alt kol ve bilekler (sağ taraf) için değerlendirmeler yapılmıştır (Şekil 5).



Şekil 4. REBA analizinde üst kol, alt kol ve bileklerin (sağ taraf) değerlendirilmesi (Evaluation of upper arm, lower arm and wrists (right) in REBA analysis)

Kavrama değerinin "uygun" olarak belirlenmesi ve aktivite skor değerinin eklenmesi ile REBA risk skor değeri elde edilmiştir (Şekil 6). Yapılan REBA analizinde çalışanın öne doğru uzanarak çalışmasına bağlı olarak özellikle gövdede ve üst kolda zorlanmaların fazla olduğu Şekil 3.b'de görülmüştür. REBA skoru 9 olarak bulunmuştur ve risk seviyesi *Yüksek*'tir. Bu çalışma pozisyonu iyileştirilmelidir.

REBA - Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi

Boyun/Gövde ve Bacaklar Yık. Üst kol, Alt kol ve Bilek. Kuvvet Aktivite ve Sonuç

Aktivite

Bir veya daha fazla vücut bölgesi sabit (ör: 1 dakikadan uzun süre tutma)

Kesa aralıklarla tekrar eden işler (ör: 1 dakikada 4'ten fazla tekrar eden iş) (yürüme hariç)

Yapılan iş durumu hızlı ve büyük değişikliklere neden oluyorsa veya sabit olmayan zeminde çalışılıyorsa

Getir Sonuç

Sonuçlar

Skor : 9

Skor	Risk
1	Önemiz risk
2 ya da 3	Düşük risk. Değişiklik gerekli olabilir
4 - 7 Arası	Orta risk. Daha fazla araştırma. Yalınca değiştirilebilir
8 - 10 Arası	Yüksek risk. Araştırma ve önlemler uygulanmalı
11 ve daha fazlası	Çok yüksek risk. Değişim uygulanmalı

Raporlama

İşçinin Adı

Şirket

Bölüm

Fonksiyon

Görev Açıklaması

Yazdırılan son PDF ay. PDF Oluştur

Şekil 5. Aktivite ve REBA risk skoru değerlerinin belirlenmesi (Determination of the value of the activity and the REBA risk scores)

Montaj işlemi çalışanın çalışma pozisyonu için gerçekleştirilen OWAS analizinde; sırt, kol ve bacak duruşuna göre kodlar belirlenmiştir (Şekil 7). Şekil 7'de görüldüğü gibi çalışan öne eğilmiş ve yana dönmüştür, sırt duruşu değeri "4" tür. Bir kol omuz seviyesinin üstünde olduğu için kol değeri "2" ve oturarak çalıştığı için bacak değeri "1" olarak verilmiştir. Yük/Güç kullanımı 10 kg'ın altında olduğundan değeri "1" dir. Belirlenen sırt, kol, bacak duruş değerleri ve yük/güç kullanım değerlerine göre OWAS eylem sınıfı "3" olarak belirlenmiştir. OWAS analizine göre çalışanın çalışma pozisyonu için; *yüklenme ve zorlanma fazladır ve "Ergonomik düzenleme mümkün oldukça erken yapılmalıdır"*.

OWAS - Çalışma Duruşları Analiz Sistemi

Sırt, Kollar, Bacaklar ve Yük Sonuç ve Raporlama

Sırt

Dik  Eğilim  Dönük  Eğilim ve Dönük

Kollar

Kollar Omuz Seviyesi Altında  Bir Kol Omuz Seviyesi Üzerinde  Kollar Omuz Seviyesi Üzerinde

Bacaklar

Oturup  Ayakta - İki Ayak Üzerinde  Ayakta - Tek Ayak Üzerinde  Çömelme - İki Ayak Üzerinde  Çömelme - Tek Ayak Üzerinde  Diz Çöküş  Yürüyüş

Yük

10 kg'dan az  10 kg - 20 kg arasında  20 kg'dan fazla

Hesapla

Şekil 6. OWAS analizinde sırt, kol ve bacak duruşunun belirlenmesi (Determination of back, arm and leg position in OWAS analysis)

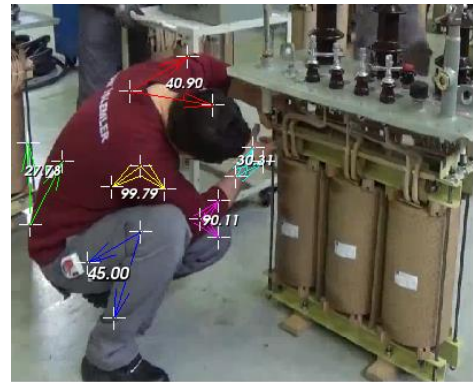
Analiz edilen bir diğer çalışma duruşu, son işlemler personelinin üst klemp bağlantılarının gerçekleştirilmesi ve emniyet somunlarının ilgili alanlara yerleştirilmesi esnasındaki duruşudur.

Son işlemler çalışmanı 5 kg'ın altında yük uygulamakta ve bu işlemi vardiyada ortalama 40 kere tekrarlamaktadır.

Transformatör kapağının yerden yüksekliği transformatöre göre değişmekle birlikte genellikle 100 kVA bir transformatör için 750 mm ile 950 mm arasında değişmektedir. Hat çalışanlarının boy uzunlukları 163 cm ile 178 cm arasında olduğundan transformatör kapağının alt kısmındaki montaj işlemleri esnasında çalışanların çömelerek eğilmeleri gerekmektedir (Şekil 8.a-b). Gün içerisinde tekrarlayan bu çalışma duruşları; çalışanları zorladığından Şekil 8'de verilen çalışma duruşlarının REBA ve OWAS yöntemleri ile analizleri gerçekleştirilmiştir.



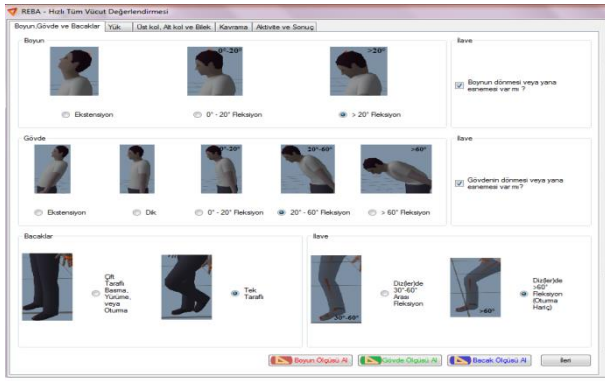
a)



b)

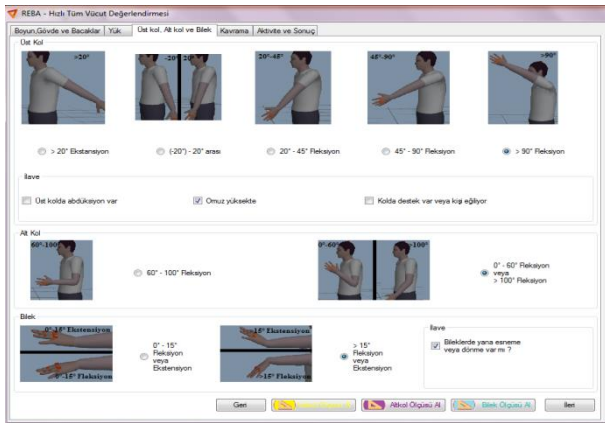
Şekil 8. Son işlemler çalışanın çalışma pozisyonu (Work position of the last operation worker) [23]

Çalışma pozisyonu için gerçekleştirilen REBA ve OWAS analizleri sırasıyla verilmiştir. REBA analizi için; öncelikle boyun, gövde ve bacaklar için nötral duruma göre hareket değerlendirilmiş ve skor değerleri belirlenmiştir (Şekil 9).



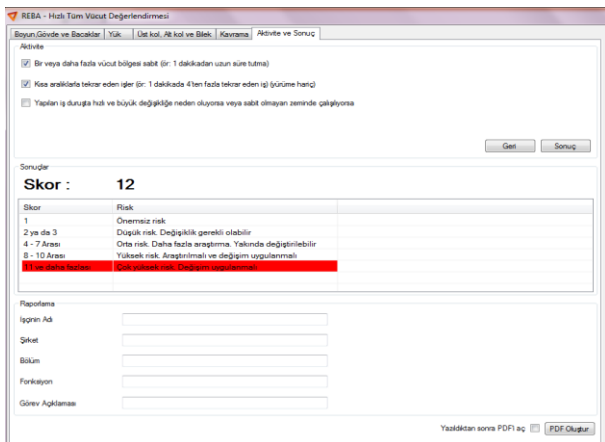
Şekil 7. REBA analizinde boyun, gövde ve bacakların değerlendirilmesi (Evaluation of neck, trunk and legs in REBA analysis)

Yük değeri 5 kg'dan az olarak değerlendirilmiş ve üst kol, alt kol ve bilekler (sol taraf) için puanlamalar yapılmıştır (Şekil 10).



Şekil 8. REBA analizinde üst kol, alt kol ve bileklerin (sol taraf) değerlendirilmesi (Evaluation of upper arm, lower arm and wrists (left) in REBA analysis)

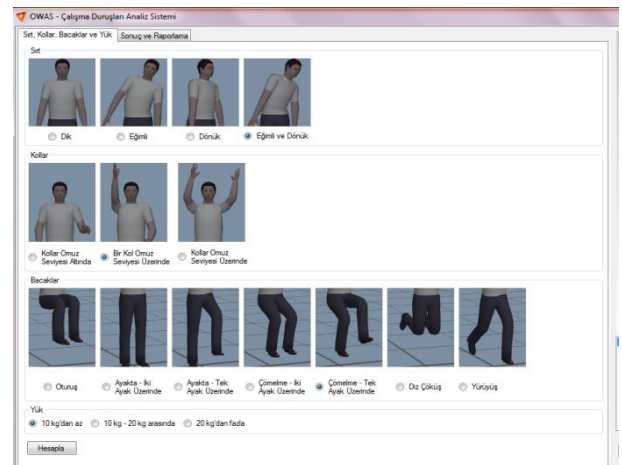
Kavrama değerinin "uygun" olarak belirlenmesi ve aktivite skor değerinin eklenmesi ile REBA risk skor değeri elde edilmiştir (Şekil 11).



Şekil 9. Aktivite ve REBA risk skoru değerlerinin belirlenmesi (Determination of the value of the activity and the REBA risk scores)

Yapılan REBA analizinde çalışanın çömelerek ve eğilerek çalışmasına bağlı olarak gövdede, boyunda, bacaklarda ve üst kollarda zorlanmaların fazla olduğu görülmüştür (Şekil 8.b-nötral duruma göre çalışma pozisyonu açıları). REBA sokuru 12 olarak bulunmuştur ve risk seviyesi *Çok Yüksek*'tir. Bu çalışma pozisyonu iyileştirilmelidir.

Son işlemler çalışanın çalışma pozisyonu için gerçekleştirilen OWAS analizinde; sırt, kol ve bacak duruşuna göre kodlar belirlenmiştir (Şekil 12). Çalışan öne eğilmiş ve yana dönmüştür, sırt duruş değeri "4" tür. Her iki kol omuz seviyesinin altında olduğu için kol değeri "1" ve çömelerek çalıştığı için bacak değeri "5" olarak verilmiştir. Yük/Güç kullanımı 10 kg'ın altında olduğundan değeri "1" dir. Belirlenen sırt, kol, bacak duruş değerleri ve yük/güç kullanım değerlerine göre OWAS eylem sınıfı "4" olarak belirlenmiştir. OWAS analizine göre çalışma pozisyonu için; *yüklenme ve zorlanma çok fazladır ve "Derhal Ergonomik Düzenleme Yapılmalı"* dır.



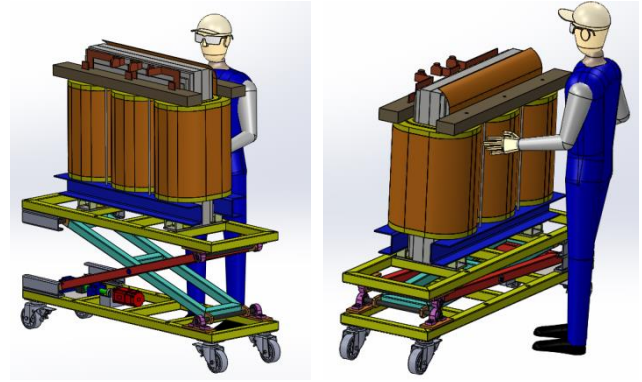
Şekil 10. OWAS analizinde sırt, kol ve bacak duruşunun belirlenmesi (Determination of back, arm and leg position in OWAS analysis)

OWAS ve REBA yöntemleri ile montaj ve son işlemler sürecinde çalışanların çalışma pozisyonlarından, çalışanları en çok zorlayanlar dikkate alınmıştır. Bu çalışma pozisyonları değerlendirildiğinde; REBA ve OWAS ile belirlenen riskli vücut bölgelerinin, CMDQ ile belirlenen riskli vücut bölgeleriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. REBA yönteminde sırt ve bel ayrı olarak verilmemekte, gövde başlığı altında değerlendirilmektedir. REBA yöntemi ile gövde, boyun, bacaklar, üst ve alt kollar, bilek değerlendirilirken; OWAS yöntemi ile sırt, kol ve bacak duruşu değerlendirilmektedir. CMDQ'daki vücut bölgelerine karşılık olması açısından hem REBA hem OWAS yöntemleri birlikte kullanılmıştır. Anket sonucunda sırt, bel, ayaklar,

boyun, sağ pazu ve omuzlar en riskli vücut bölümleri olarak belirlenirken, çalışma pozisyonlarının REBA ve OWAS yöntemleri ile analizi sonucu aynı bölgelere ek olarak bacaklarda da yüksek risk bulunduğu değerlendirilmiştir.

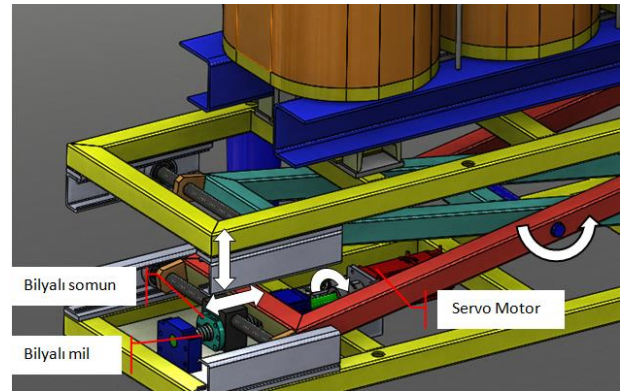
Açık gerilim iletken uçlarının izolasyonlarının açılması ve transformatör kapağının alt kısmında gerçekleştirilen montaj işlemleri gibi gün içerisinde tekrarlayan işlerde çömelerek, uzanarak veya eğilerek çalışmak çalışanlarda yorulmalara, kas-iskelet zorlanmalarına ve aynı zamanda yorulmaya bağlı olarak performans düşüklüğüne neden olabilir (Şekil 3 ve Şekil 8). Uygun olmayan çalışma duruşlarının iyileştirilmesi ile hem çalışan açısından, hemde iş verimi açısından kazanımlar elde edilebilecektir. Bu durumun iyileştirilebilmesi için, yüksekliği ayarlanabilir bir montaj sehpa tasarlanmıştır (Şekil 13). Ayarlanabilir yükseklik ile montaj işleminin, mümkün olduğunca dirsek hizasında yapılabilmesine imkan sağlanacak, böylece çalışanın eğilip-bükülmesinin önüne geçilecektir. Önerilen montaj sehpa tasarımının gerçekleştirilmesiyle özellikle sırt, bel, boyun, üst ve alt kol bölgelerindeki zorlanmaların azalacağı değerlendirilmektedir. Çalışma yüksekliğinin ayarlanması için önerilen tasarımda; bilyalı mil ve bunu tahrik eden bir servo motor kullanılmıştır (Şekil 14). Sehpanın çalışana özel olarak ayarlanabilmesi için, bir RFID sistemi ile personel tanımlama işlemi yapılarak, gerekli yüksekliğe otomatik ayarlama yapılması mümkün kılınabilir. Montaj sehpa tasarımında, montaj çalışanlarının antropometrik ölçümleri (boy, dirsek yüksekliği, öne uzanma-kavrama ölçüleri) dikkate alınmıştır. Sehpa tasarımında çalışanların dirsek yüksekliğinde çalışma yapması planlanmış ve bu amaçla 38 montaj çalışanın dirsek yüksekliği ölçülmüştür. Sehpanın minimum yüksekliği belirlenirken transformatör kapağının üzerindeki iş bölgesi yüksekliğinin çalışanların alt %5'inin dirsek yüksekliğini aşmayacak şekilde olması öngörülmüştür. Sehpanın maksimum yüksekliği belirlenirken ise transformatörün alt bölgesindeki iş bölgesi yüksekliğinin çalışanların alt %5'inin dirsek yüksekliğini aşmayacak şekilde olması dikkate alınmış ve sehpa yüksekliği 102,5 cm olarak belirlenmiştir. Çalışma esnasında zaman zaman eğilme, uzanma hareketleri gibi çalışana zorlayan uygun olmayan çalışma duruşları söz konusu olabilmektedir. Çalışmada, bu hareketleri ortadan kaldıracak ayarlanabilir bir montaj sehpa tasarımı yapılmıştır. Önerilen tasarımda, sehpa yükseklikleri ayarlanabilir olduğundan, çalışana

uygun çalışma yüksekliği istenildiği şekilde ayarlanabilecektir.



a) Sehpa yüksekliği maksimum b) Sehpa yüksekliği minimum  
Şekil 11. Montaj sehpa tasarımı (Design of assembly table)

Montaj sehpa SolidWorks ile tasarlanmıştır. Sehpanın boyutları 500x1600 mm ve sehpanın minimum kapanma yüksekliği 264 mm, maksimum açılma yüksekliği 864 mm'dir.



Şekil 12. Sistem görünüşü (System appearance)

Şekil 14 'de görüldüğü üzere sistemin çalışırken; servo motordan bilyalı mile aktarılan dönme hareketi, bilyalı somun ile öteleme hareketine dönüştürülmektedir. Öteleme hareketi ile makas mekanizması sayesinde sehpanın yüksekliği ayarlanmaktadır.

Bu çalışmada ergonomik bir montaj sehpa tasarımı geliştirilmesinin birincil amacı, montaj çalışanlarının çalışma koşullarının iyileştirilmesi ve kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarının azaltılmasıdır. Ayrıca, yeni ergonomik sehpa tasarımının uygulanmasıyla çalışan performansının ve kas-iskelet sistemi rahatsızlıkları kaynaklı işgücü kaybının azalacağı değerlendirilmektedir.

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada transformatör imalatçısı bir firmanın montaj hattında ergonomik iyileştirmeler

yapabilmek için CMDQ, REBA ve OWAS yöntemleri ile analizler yapılmış ve montaj işlerinde çalışan personelin çalışma pozisyonları değerlendirilmiştir. Literatürde erişilebilen kaynaklarda transformatör sektöründe montaj işlemlerinde hem ankete hem de gözleme dayalı analiz yöntemlerini birlikte kullanan bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışmanın literatüre katkısı, sübjektif bir değerlendirme yöntemi olan CMDQ ile gözleme dayalı REBA ve OWAS yöntemlerinin birlikte değerlendirilmesi ve sonuçların karşılaştırılmasıdır. CMDQ sonucunda ağırlıklı olarak eğilerek ve çömelerek çalışmaya bağlı olarak sırt, bel, ayaklar, boyun, sağ pazu ve omuzlar en riskli vücut bölümleri olarak belirlenmiştir. Montaj işlemi personeli oturarak, ancak öne doğru uzanarak ve eğilerek çalışmaktadır. Gövde ve üst kollarda nötral duruştan uzaklaştığı için zorlanmalar olmaktadır. Üst kol yukarıya kalkmakta, omuz yükselmektedir. Öne doğru uzanma ve eğilme hareketi nedeniyle sırt ve belde zorlanmalar oluşmaktadır. Aynı şekilde son işlemler personeli bacaklarını bükerek çalışmaktadır. Üst klemp civatalarını takma ve bu civataları sıkıştırma işlemini gerçekleştirirken, rahat görüş açısı yakalayabilmek için gövdesini ve boynunu eğmektedir. Gövdedeki ve boyndaki öne ve yana eğilme hareketi, gün içerisinde tekrarlandığı için çalışana zorlamaktadır. Çalışmada, bu hareketleri ortadan kaldıracak ayarlanabilir bir montaj sehpa tasarımı yapılmıştır. Hem montaj işlemi personeli, hem de son işlemler personeli kendisine uygun olan sehpa yüksekliğini ayarlayarak çalışmalarını kas-iskelet sistemlerini zorlamadan yapabilecektir. Buna bağlı olarak çalışan memnuniyeti ve performansında iyileşme beklenmektedir. Bu çalışma; süre ve firmanın üretim karakteristiklerinden kaynaklı kısıtlardan dolayı dağıtım transformatörlerinin montajının yapıldığı hatta gerçekleştirilmiş olup, firmanın diğer ürünlerinin üretiminin gerçekleştirildiği montaj birimleri için genellenemez. Gelecek çalışma olarak, yeni montaj sehpasının uygulamaya alınmasıyla çalışanlar üzerindeki etkisi incelenecektir.



#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışmaya katkıları nedeniyle Balıkesir Elektromekanik Sanayi Tesisleri (BEST) A.Ş. AR-GE Merkezine teşekkür ederiz.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Li, G., and Buckle, P., "Evaluating change in exposure to risk for musculoskeletal disorders: A practical tool." HSE Books, England: Suffolk, 1999.
- [2] Esen H., Fıgıllı N., Çalışma duruşu analiz yöntemleri ve çalışma duruşunun kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına etkileri, SAÜ. Fen Bil. Der., 17 (1), 41-51, 2013.
- [3] Kara, Y., Atasagun, Y., Gökçen, H., Hezer, S., and Demirel, N., "An integrated model to incorporate ergonomics and resource restrictions into assembly line balancing." International Journal of Computer Integrated Manufacturing 27 (11), 997–1007, 2014.
- [4] Ayan B., "Montaj Hattında Ergonomik Risk Unsurlarının İncelenmesi: Otomotiv Sektörüne Yönelik Bir Uygulama", Uzmanlık Tezi, T.C. Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim ve Araştırma Merkezi Ankara, 2015.
- [5] Otto, A., and Scholl, A., "Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing." European Journal of Operational Research 212 (1): 277–286, 2011.
- [6] Gonen D., Oral A., Yosunlukaya M., "Computer-Aided Ergonomic Analysis for Assembly Unit of an Agricultural Device", Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries 26 (5), 615–626, 2016.
- [7] Battini, D., Faccio, M., Persona, A., and Sgarbossa, F., "Linking ergonomics evaluation and assembly system design problem in a new integrated procedure" In the Proceedings of the 19th International Conference on Production Research, Vicenza Italy, 2007.
- [8] Özgörmüş E., "Ergonomik Koşullar Altında Montaj Hattı Dengeleme", Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2007.
- [9] Demirkol, S., Baykasoglu, A., "ErgoALWABP: a multiple-rule based constructive randomized search algorithm for solving assembly line worker assignment and balancing problem under ergonomic risk factors", Journal of Intelligent

- Manufacturing,2016. DOI 10.1007/s10845-016-1246-6
- [10] Baykasoglu, A., Tasan, S.Ö., Tasan, A.S., Demirkol, S., Modeling and solving assembly line design problems by considering human factors with a real-life application. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries*, 2017. DOI: 10.1002/hfm.20695
- [11] Kuorinka, I., Jonsson, B., Kilbom, A., Vinterberg, H., Biering-Sørensen, F., Andersson, G., Jørgensen, K., “Standardised Nordic Questionnaires for the Analysis of Musculoskeletal Symptoms”, *Applied Ergonomics*, 18 (3), 233-237, 1987.
- [12] Hildebrandt V. H., “Prevention of work related musculoskeletal disorders: setting priorities using the standardized Dutch Musculoskeletal Questionnaire”, Doctoral Dissertation, Delft University of Technology, Delft, 2001.
- [13] Hedge, A., Morimoto, S., Mccrobie, D., “Effects of Keyboard Tray Geometry on Upper Body Posture and Comfort”, *Ergonomics*, 42 (10), 1333-1349, 1999.
- [14] Koç S., Testik Ö. M., “Mobilya Sektöründe Yaşanan Kas-İskelet Sistemi Risklerinin Farklı Değerlendirme Metotları ile İncelenmesi ve Minimizasyonu”, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 27 (2), 2-27, 2016.
- [15] Menzel, N. N., “Manual Handling Workload and Musculoskeletal Discomfort in Nursing Personnel”, Phd Thesis, Department of Environmental and Occupational Health, University of South Florida, 2001.
- [16] Jansen, K., Luik, M., Reinvee, M., Viljasoo, V., Erelina, J., Gapeyeva, H., Pääsuke, M., “Musculoskeletal Discomfort in Production Assembly Workers”, *Acta Kinesiologiae Universitatis Tartuensis*, 18, 102-110, 2012.
- [17]<http://ergo.human.cornell.edu/ahmsquest.html>(Erişim Tarihi: 02.02.2015)
- [18] Kara, Y., Atasagun, Y., Peker, A., “*Montaj Hatlarında Çalışma Duruşlarının REBA Yöntemi ile Analizi ve Ergonomik Risk Değerlendirmesi*”, 7. Uluslararası İş Sağlığı ve Güvenliği Konferansı, 5 - 7 Mayıs, İstanbul, 2014.
- [19] Hignett, S., McAtamney, L., “Rapid Entire Body Assessment (REBA)”, *Applied Ergonomics*, 31 (2), 201-205, 2000.
- [20] Akay, D., Kurt, M., Dağdeviren, M., “Çalışma Duruşlarının Ergonomik Analizi”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 18(3), 73-84, 2003.
- [21] Eriş H., Can G. F., Fıçlalı N., “Çalışma Duruşu ve Kas-İskelet Sistemi Rahatsızlıkları”, V. Endüstri Mühendisliği Bahar Konferansları-Ergonomi, sayı: 129, 2009.
- [22] Kocabaş M., “Ağır ve Tehlikeli İşlerde Çalışan İş Görenlerde Zorlanmaya Neden Olan Çalışma Duruşlarının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Selçuk Üniversitesi, 2009.
- [23] Karaoğlan, A.D., Ocaktan, M.A.B., Gönen, D., Oral, A., Cicibaş, A., “Bir transformatör işletmesinde montaj hattı çalışanlarının kas iskelet sistemi rahatsızlıklarının analizi ve yeni bir montaj sehпасı tasarımı”, 22. Ergonomi Kongresi, 6-8 Ekim, Denizli, 2016, (Özet Sunum).
- [24][http://akroengineering.com/files/TechnicalPapers/uMEDERgonomy\\_REBARULA\\_MAKALE\\_ErolC.pdf](http://akroengineering.com/files/TechnicalPapers/uMEDERgonomy_REBARULA_MAKALE_ErolC.pdf) (Erişim Tarihi: 03.08.2016).

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a>		
	<u>Geliş/Received</u> 07.03.2017 <u>Kabul/Accepted</u> 08.09.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.296712	

## Numerical investigation of operating fluid, rotating disk speed effects and number of cavities on drag reduction of micro-textured surfaces for hydrodynamic lubrication

Ahmet Çağrı Develi\*<sup>1</sup>, Ali Bahadır Olcay<sup>2</sup>

### ABSTRACT

There have been developments on surface texturing methods providing benefit in a great many engineering applications. Especially, influence on surface texturing in lubrication applications related to frictional properties have been cause of concern. In the present study, it was aimed to work on the computational fluid dynamics (CFD) study of the lubrication system consisting of two parallel plates. While one of the plates was sliding, the other one was stationary and an incompressible two-dimensional single phase flow was assumed between those plates. The scope of the CFD analysis was to determine the relationship between drag force and operating fluid properties (i.e., oil types), rotational speed and the amount of the cavities. It was realized that SAE 0W-30 was found to be the best fluid among the seven studied oil types providing optimal conditions such as high drag reduction and less drag force. It was noticed that the drag coefficient thus, drag force appeared to be increasing as the rotating disk speed rose. The influence of the number of the cavities along the textured surface was also investigated in the present study and it was found that drag reduction was not associated with the number of cavities because 0, 1, 2 and 3 cavities nearly gave the same drag force values.

**Keywords:** Hydrodynamic lubrication; micro-textured surface; oil type; rotational speed; cavity; computational fluid dynamics (CFD)

### Hidrodinamik yağlamada kullanılan mikro-doku yüzeyler üzerinde akışkanın, diskin açısız hızının ve boşluk sayısının direnç azalmasına etkilerinin sayısal incelenmesi

### ÖZ

Yüzey dokusu yöntemlerinde gelişmeler yaşanırken bu gelişmelerden birçok mühendislik uygulamaları fayda sağlayabilir. Özellikle sürtünme özellikleri ile ilgili yağlama uygulamalarında yüzey dokusu etkisi önemli bir etkiye sahiptir. Bu çalışma kapsamında iki paralel plakadan oluşan yağlama sisteminin hesaplamalı akışkanlar dinamiği çalışmasıyla incelenmesi hedeflenmiştir. Plakalardan birisi hareket ederken, diğer plaka sabittir ve plakalar arasındaki akış, sıkıştırılmaz, iki boyutlu ve tek fazlı olarak kabul edildi. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizinin amacı direnç kuvvetindeki azalmanın, çalışan akışkan özellikleri (yani yağ çeşidi), açısız hız ve boşluk miktarı ile nasıl ilişkili olduğunu belirlemektir. Bu çalışmada SAE 0W-30 tipi yağın, çalışılan yedi yağ arasında en yüksek direnç düşüşü ve daha az direnç kuvveti sağladığı için en uygun koşulları sağlayan akışkan olduğu belirlenmiştir. Direnç katsayısının ve dolayısıyla direnç kuvvetinin açısız hızın artmasıyla arttığı fark edilmiştir. Boşluk sayısının yüzey dokusuna etkisi de bu çalışma kapsamında araştırılmıştır ve dirençteki azalmanın boşluk sayısı ile ilişkili olmadığı bulunmuştur. Bunun nedeni 0, 1, 2 ve 3 boşluk yerleştirildiğinde neredeyse aynı direnç kuvvetleri elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrodinamik yağlama; mikro-doku yüzeyi; yağ çeşidi; açısız hız; boşluk; hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

\* Corresponding Author

<sup>1</sup> Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Yeditepe University, Turkey, ahmetcagrideveli@gmail.com

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Mechanical Engineering Department, Yeditepe University, Turkey, bahadir.olcay@yeditepe.edu.tr



## 1. INTRODUCTION

In recent years, there have been developments on surface texturing methods beneficial to many engineering applications. Especially, influence on surface texturing in lubrication applications related to frictional properties have been raised as an important concern by Hamilton et al. [1] and Anno et al. [2]. In their study, the impact of the cavity number, operating fluid and rotational speed on the hydrodynamic lubrication were evaluated. Their numerical model had two-dimensional parallel plates where one of them was sliding. There have been other experimental studies [3] conducted and succeeded marginal developments on hydrodynamic aspects in this field as well. For instance, Scaraggi et al. [4, 5] observed micro-cavity and depth effect of frictional characteristics experimentally. Moreover, a wide variety of numerical approaches have been proposed to estimate the properties of lubrication systems as regards the Reynolds or Navier-Stokes equations. In another study, Caramia et al. [6] approached the same phenomena both numerically and theoretically. They ran the same two-dimensional simulations in order to investigate the impact of the geometric parameters on the drag reduction and pressure forces. Specifically, they investigated the influence of cavity depth, height and gap on the drag reduction along with the pressure and viscous forces. They simulated a textured surface lubrication system, provided drag force calculation on the holder and defined a non-dimensional drag force. Furthermore, they focused the velocity profile in the micro-cavities and reported the results with effect of the shear stresses.

In hydrodynamic lubrication, the pressure condition of the fluid is crucial to assure better performance of the lubricated elements of components such as journal bearings. Therefore, experiments were proceeded to measure the pressure distribution around a journal bearing and frictional fluid force of the bearing caused by shearing reasons [7]. Kasolang et al. [7] utilized a journal diameter of 100 mm with variety of length-to-diameter ratio and obtained pressure results at different radial loads. They compared experimental results to estimated ones from established journal design charts (Raimondi and Boyd [8]). They also witnessed that the location

of the maximum pressure for the given operating conditions was almost same with the estimated value. Najjar et al. [9] solved Reynolds equation using finite difference method on the surface pad to determine pressure profile in the lubricant film. Their works assessed pressure at various locations. They showed that the maximum average value of pressure was roughly 12% larger than the former results. Von Gesseneck et al. [10] indicated a torque based method for remote displaying radially loaded deep groove ball bearings. They identified parameters of the bearing torque in time and frequency domains. Liming et al. [11] conducted thrust bearing lubrication analysis by combining finite element analysis with Reynolds equations. They used cyclic symmetric condition in order to simulate film flow. They found the influence of the rotational speed of the mirror plate on the lubrication characteristics indicated the thrust load had to be balanced against the oil film temperature and pressure for the optimized design perspectives. Susilowati et al. [12] investigated the hydrodynamic performance of journal bearing lubricated by thin film performed by three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model for two flow regimes as a main interest namely, laminar and turbulent regimes. They varied Reynolds number to see the significant effect on the hydrodynamic pressure. In a general view, their analysis concluded that characteristics of static hydrodynamic pressure indicate similar trends for laminar and turbulent regions.

In the present study, fluid flow characteristics of incompressible fluids between two parallel plates were numerically investigated to understand the lubrication behavior of the system. Mainly, the scope of the numerical analysis was to determine effect of rotational speeds, operating fluid properties and cavities on drag force reduction. The current study had a numerical model similar to Caramia et al. [6]; therefore, the numerical model was first validated based on non-dimensional drag force findings of that work. Then, authors reported their validation in terms of the test results by Scaraggi et al. [4, 5]. Following that, mesh convergence tests were performed by monitoring the velocity profile at the gap, drag coefficient and non-dimensional drag force. Once the validated numerical model was obtained, dependency of drag force reduction on rotational speed, operating fluid conditions and cavity numbers were reported in the present investigation. Finally, computational domains

with and without cavities were also studied by evaluating reduction in drag force of the system.

## 2. NUMERICAL DOMAIN

Caramia et al. [6] inspired from the pin-on-disk tribometer experimental set up of Scaraggi et al. [4, 5] for friction measurements. Scaraggi et al. [4, 5] conducted experimental tests with different laser-textured bearing balls joined together in the pin holder as shown in Figure 1. Caramia et al. [6] specifically focused on the surface between ball holder and disk holder. Therefore, they utilized a two-dimensional computational model along with boundary conditions as shown in Figure 2 to provide a theoretical explanation by using numerical approach. The detail dimensioning (enlarged view of dashed rectangle in Figure 2) of textured surface with the geometric parameters computational model are illustrated in Figure 3 and the related parameters are provided in Table 1. They presented nearly 80% drag reduction for different dimensions and flow rates [6].

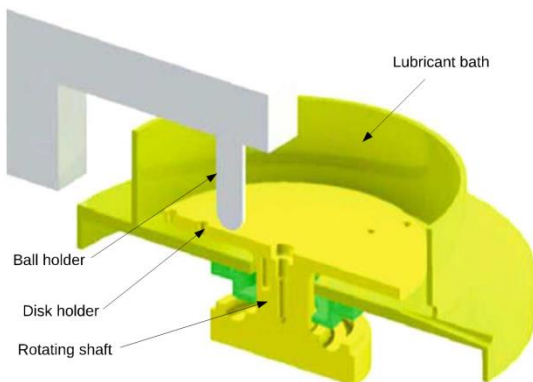


Figure 1. Experimental setup sketch by Scaraggi et al. [4, 5]

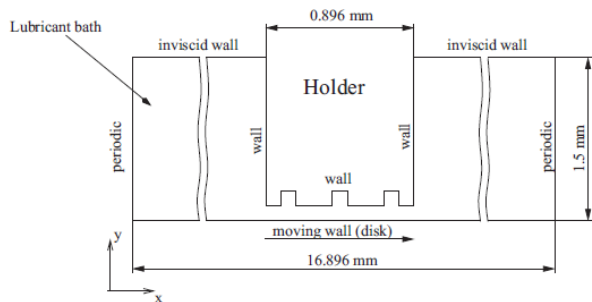


Figure 2. Computational geometry and boundary conditions by Caramia et al. [6]

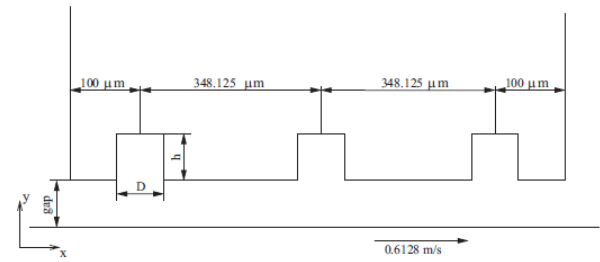


Figure 3. Local view of the textured surface with the geometric parameters displayed

Table 1. Dimensions of the geometric parameters of Caramia et al. [6]

Parameter	Size
D (μm)	25
h (μm)	1
gap (μm)	1

In the present study, a two-dimensional computational model identical with Caramia et al. [6] was generated. Left and right vertical boundaries were very far from the holder; therefore, these boundaries were assigned as periodic boundaries to isolate the pin holder. At lower band of the geometry, the moving wall boundary condition was applied to represent the rotating disk. The flat wall movement was defined with a velocity of 0.6128 m/s in Caramia et al.'s [6] study; but, this velocity was varied to understand the effect of velocity on the drag coefficient in the present study. Inviscid boundary condition was defined for the upper side and this ensured slip condition meaning that no frictional forces were considered. However, pin holder was crucial for the simulation and assumed as no slip condition. The wall of the pin holder and moving wall was also modeled in more detail due to importance for the result of the drag force reduction. Quadrilateral elements were employed for the whole domain instead of triangular elements which was used by Caramia et al. [6]. Particularly, more elements compared to the other part of the domain were placed at the corner of the cavities to capture velocity gradients in that region accurately as seen in Figure 4.

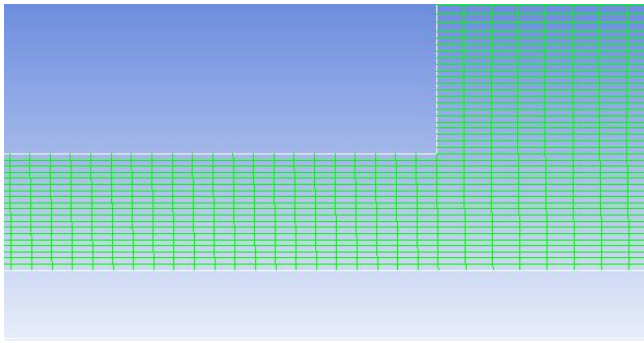


Figure 4. Quadrilateral elements at the corner of the cavity

The minimum grid dimension was specified as  $0.25 \mu\text{m}$  near the wall and mesh independency study was also performed to validate the results with findings of earlier work. Variations of non-dimensional drag force, drag coefficient defined as the ratio of the actual flow rate to theoretical flow rate and the velocity profile at the center of the cavity with respect to total grid number were monitored to check whether the results were grid dependent or not. Velocity profile at the center cavity was also evaluated and plotted in Figure 5. It was noted that use of 2 million elements in CFD model helped to capture the characteristics of velocity profile at the center cavity better than the use of 1.2 million and 0.6 million as shown in Figure 5. Those results by Caramia et al. [6] were also discussed to support the validation of the mesh independency study in the same plot. Briefly, the results showed that  $C_d = 45.19$  for the cells with a number of 2 million,  $C_d = 45.94$  for the cells with a number of 1.2 million and  $C_d = 44.27$  for 0.6 million as provided in Table 2. As to compare the non-dimensional drag force, the value of 944 for 2 million elements, 942.81 for 1.2 million elements and 925.04 for 0.6 million elements as given in Table 2. Caramia et al. [6] divided the micro channel in 20 at y axis and reported that value of the non-dimensional drag force is around about 943. We proceed to the studies in this article with CFD model having 2000000 elements and obtained non-dimensional drag force to be 944 within 0.1% difference from Caramia et al.'s [6] finding.

Table 2. Drag coefficient and non-dimensional drag force comparison with Caramia et al. [6]

Number of elements	$C_d$	$T$
600000 elements	44.27	925.04
1200000 elements	45.12	942.81
2000000 elements	45.19	944
Caramia et al. (1200000 elements)	45.14	943.15

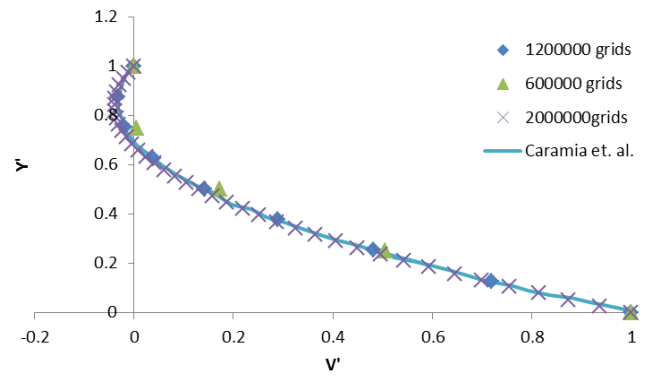


Figure 5. Velocity profile at the center cavity

Fluid flow characteristics in the gap between parallel plates were simulated using computational fluid dynamics (CFD) software, namely Ansys Fluent 12. The governing equations, namely continuity and two-dimensional Navier-Stokes equations given in equations (1) and (2), were solved using a finite volume method for laminar incompressible fluid flow to determine the velocity field and drag coefficients. The solver scheme was selected to be second order accurate and the SIMPLE algorithm was utilized for pressure-velocity coupling while second order upwind scheme was used in discretization of convective terms. Lastly, the convergence criteria were set to  $10^{-4}$  for simulations.

$$(\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \bar{u} \quad (1)$$

$$\nabla \bar{u} = 0 \quad (2)$$

Here,  $p$  was pressure,  $\bar{u}$  was the velocity vector and  $Re$  was the Reynolds number and defined as;

$$Re = \frac{\rho U_{gap}}{\mu} \quad (3)$$

where  $\rho$  was the fluid density,  $\mu$  the dynamic viscosity of the operating fluid,  $U$  was the rotating disk (moving wall) velocity and gap was the distance between plates and set to  $1 \mu\text{m}$  for CFD model. The non-dimensional drag force was defined by Caramia et al. [6] as below;

$$T = \frac{F_x}{\mu UL} \quad (4)$$

where  $L$  was the unitary length and  $F_x$  was the drag force calculated as  $F_x = C_d A_{wet} \frac{1}{2} \rho U^2$ . Here,  $A_{wet}$  represented the surface area of the pin holder and  $C_d$  was the drag coefficient.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Effect of Operating Fluid in Lubrication Flow

In the present study, we have selected seven oil types with different in densities and dynamic viscosities to understand what type of fluid works with lowest drag. It was observed that drag coefficient; thus, drag force depended on the viscosity of the fluid. Table 3 shows viscosity and density values of different oil types used in this study. These fluids were used as working fluids in CFD simulations to determine the optimum oil providing the most reduction in drag. Figure 6 displays the reduction in drag force in terms of oil types. As one can remember, Reynolds number was calculated based on rotating disk velocity in order to discuss effect of the fluid type over the reduction in drag force in this study. Therefore, moving wall speed was maintained constant at 0.6128 m/s for all simulations for each operating oils. As it appears, SAE 0W-30 oil provided minimum drag force and was the best of all along the other studied fluids given in Table 3. However, both SAE 50 and SAE 10W-60 oils have higher kinematic viscosities than other oils tabulated in Table 3. For example, SAE 15W-40 oil may seem to be the optimum liquid for the lubrication system to provide high reduction in drag force because of drag coefficient and influence of the dynamic viscosity on the drag force. Noting that the velocity of the rotating disk and gap between the parallel plates were same for all evaluations and drag coefficient was directly proportional to the kinematic viscosity and inversely proportional to Reynolds number. As per Figure 7, the drag force increases as the kinematic viscosity increases. This is probably due to fact that viscous fluids cause high drags because of frictional losses. Furthermore, as the molecular motions in the fluid are getting more restricted, drag force against fluid flow increases exponentially. Therefore, the reduction in drag force or the non-dimensional drag force is optimal at a certain range of Reynolds number.

Table 3. Density and dynamic viscosity of operating fluids [13]

Type of oil	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Dynamic viscosity (Pa.s)
SAE 15W-40	866.3	0.091057
SAE 10W-40	850.5	0.07933
SAE 10W-60	838	0.13552
SAE 5W-40	842.1	0.076651
SAE 0W-30	837.2	0.055926
SAE 30	869.3	0.07455
SAE 50	900	0.2403

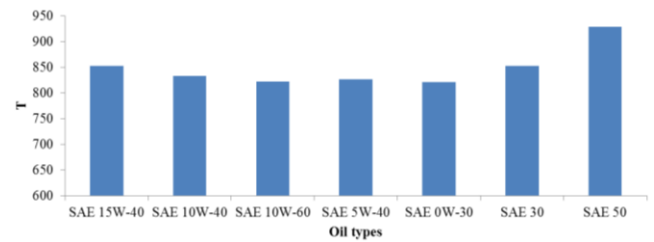


Figure 6. Reduction in non-dimensional drag force versus type of oils for moving wall speed at 0.6128 m/s

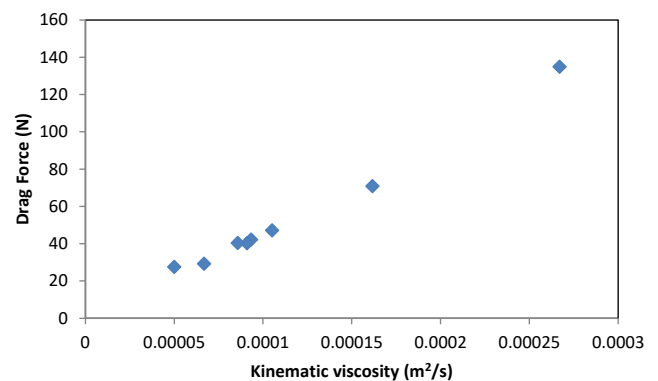


Figure 7. Drag force with respect to kinematic viscosity

#### 3.2. Effect of Reynolds Number in Lubrication Flow of the Pin Holder

In the present study, drag coefficient, reduction in drag force and drag force variation with Reynolds number were investigated. Figure 8 shows the change of drag coefficient along with Reynolds number. It was noted drag coefficient exhibited sharp decrease when Reynolds number was varied from 0.002 to 0.008. Then, drag coefficient stayed around 45. This indicated that Reynolds number needed to be larger than 0.007 so that smaller drag coefficients could be achieved.

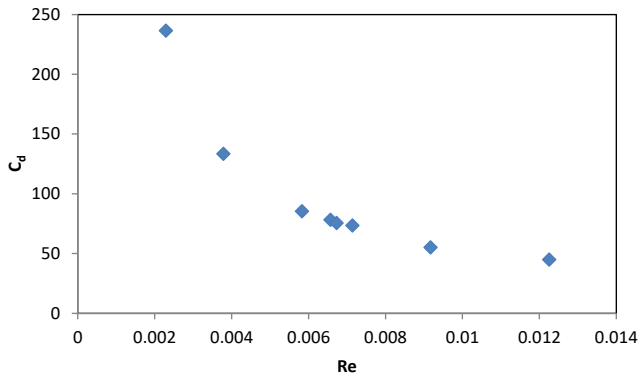


Figure 8. Drag coefficient with respect to Reynolds number

It was known that drag force typically increases significantly as the fluid velocity increases for very low Reynolds numbers ( $Re \ll 1$ ). Due to increase in drag force, non-dimensional drag force was elevated as Reynolds number increased as seen in Figure 9. For this analysis, SAE 0W-30 was selected as an operating fluid and increase in non-dimensional drag force was observed when Reynolds number was raised in Figure 9.

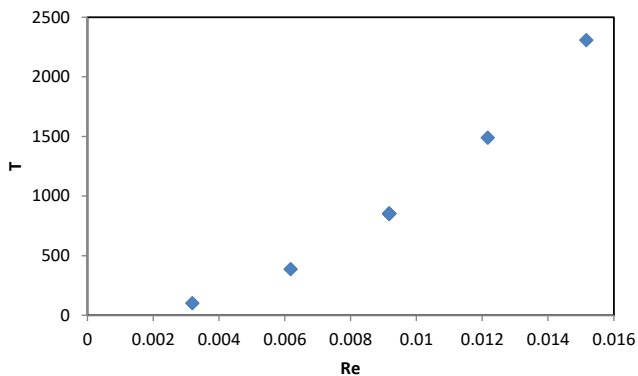


Figure 9. Reduction in drag force trend over Reynolds number

Variation of drag force was also obtained by varying wall velocity from 0.2 to 1 m/s and plotted in Figure 10. It was realized that increase in wall velocity caused increase in Reynolds number; therefore, resulting drag force appeared to be rising when the rotating disk speed was increased.

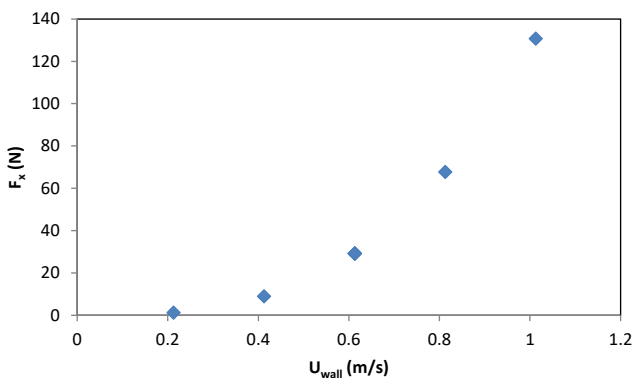


Figure 10. Drag force increasing with rotating disk velocity

### 3.3. Effect of Number of Cavities on Reduction in Force

In the present study, the effect of number of the cavities in CFD model was also investigated to determine whether the drag force can be affected or not with more or less cavities. Therefore, we based our results by choosing no cavity along the texture surface as the starting point. Then, cavities were added to the each simulation to determine drag force. Figure 11 and 12 show drag force and reduction in drag force with respect to number of cavities, respectively. It was noted that number of cavities did not have any significant effect on either drag force or drag reduction. Therefore, drag stayed nearly the same when number of cavities was changed from 0 to 1, 1 to 2 and 2 to 3. This implied that no reduction in drag force can be achieved with more or less number of cavities for the studied cases.

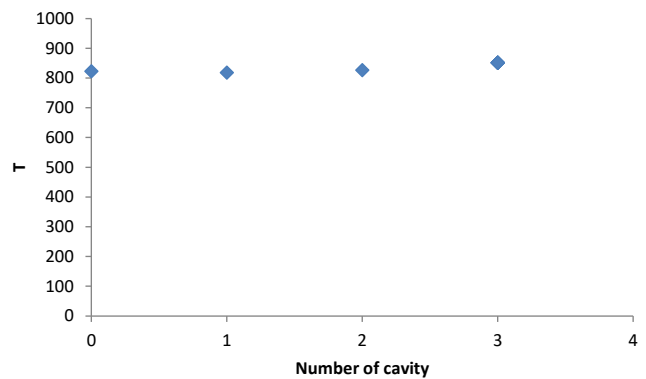


Figure 11. The drag force due to number of cavity

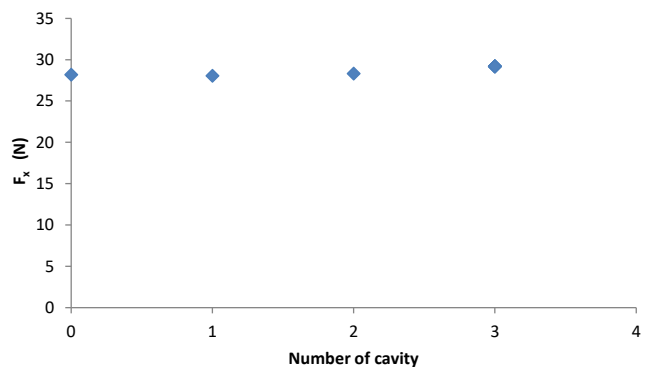


Figure 12. Reduction in drag force due to number of cavity



## 4. CONCLUSION

The hydrodynamic lubrication system which consists of parallel micro-textured surfaces was analyzed for incompressible two-dimensional flows and the generated numerical model was

validated by using flow velocity profile given by Caramia et al. [6]. Seven different types of oils were used as operating fluids and CFD simulations were performed to determine the oil with optimal conditions. It was noted that SAE 0W-30 was found to be the best fluid providing optimal conditions such as high reduction in drag force and less drag force. Moreover, the rotating disk speed was varied to produce different conditions to simulate the flow along the textured surface. The drag force and reduction in drag force were observed for each rotating disk velocity conditions. It was realized that the drag coefficient thus, drag force appeared to be increasing as the rotating disk speed rose. Specifically, when wall velocity was increased from 0.2 m/s to 1 m/s, corresponding drag force was drastically raised from nearly zero to over 130 N. This implies that rotational speed has a key role in drag force determination. The influence of the number of the cavities along the textured surface was also investigated in the present study and it was found that reduction in drag force was not associated with the number of cavities because 0, 1, 2 and 3 cavities nearly gave the same drag force values.

## REFERENCES

- [1] D. Hamilton, J. Walowit, and C. Allen, "A theory of lubrication by microirregularities," *Journal of Basic Engineering*, vol. 88, pp. 177-185, 1966.
- [2] J. N. Anno, J. Walowit, and C. Allen, "Microasperity lubrication," *Journal of Lubrication Technology*, vol. 90, pp. 351-355, 1968.
- [3] V. G. Marian, D. Gabriel, G. Knoll, and S. Filippone, "Theoretical and experimental analysis of a laser textured thrust bearing," *Tribology letters*, vol. 44, p. 335, 2011.
- [4] M. Scaraggi, F. P. Mezzapesa, G. Carbone, A. Ancona, D. Sorgente, and P. M. Lugarà, "Minimize friction of lubricated laser-microtextured-surfaces by tuning microholes depth," *Tribology International*, vol. 75, pp. 123-127, 2014.
- [5] M. Scaraggi, F. P. Mezzapesa, G. Carbone, A. Ancona, and L. Tricarico, "Friction properties of lubricated laser-microtextured-surfaces: an experimental study from boundary-to hydrodynamic-lubrication," *Tribology Letters*, vol. 49, pp. 117-125, 2013.
- [6] G. Caramia, G. Carbone, and P. De Palma, "Hydrodynamic lubrication of micro-textured surfaces: two dimensional CFD-analysis," *Tribology International*, vol. 88, pp. 162-169, 2015.
- [7] S. Kasolang, M. A. Ahmad, R.-D. Joyce, and C. F. M. Tai, "Preliminary study of pressure profile in hydrodynamic lubrication journal bearing," *Procedia Engineering*, vol. 41, pp. 1743-1749, 2012.
- [8] A. Raimondi and J. Boyd, "A solution for the finite journal bearing and its application to analysis and design: II," *ASLE Transactions*, vol. 1, pp. 175-193, 1958.
- [9] F. A. Najjar and G. Harmain, "Numerical Investigation of Pressure Profile in Hydrodynamic Lubrication Thrust Bearing," *International scholarly research notices*, vol. 2014, 2014.
- [10] J. J. von Gesseneck, B. Caers, M. Van Overmeire, D. Lefeber, B. Vanderborght, and P. Schuurmans, "A torque-based method for the study of roller bearing degradation under poor lubrication conditions in a lead-bismuth environment," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 305, pp. 121-131, 2016.
- [11] L. Zhai, Y. Luo, Z. Wang, and X. Liu, "3D Two-way coupled TEHD analysis on the lubricating characteristics of thrust bearings in pump-turbine units by combining CFD and FEA," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 29, pp. 112-123, 2016.
- [12] M. Tauviquirrahman, J. Jamari, and A. P. Bayuseno, "A Comparative Study of Finite Journal Bearing in Laminar and Turbulent Regimes Using CFD (Computational Fluid Dynamic)," in *MATEC Web of Conferences*, 2016.
- [13] Available: <http://www.viscopedia.com/viscosity-tables/substances/engine-oil/>. [Accessed: 29-May-2016].

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 07-02-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 12-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.290699	

## Çimento döner fırınlarında kullanılan bazik refrakter tuğlaların özelliklerinin karşılaştırılması

Koray Kaya<sup>1</sup>, Fatih Apaydın<sup>2\*</sup>

### ÖZ

Çimento döner fırınlarının sinter bölgesinde kullanılan bazik karakterli refrakter malzemelerin kullanımı sırasında çeşitli reaksiyonlarla meydana gelen  $Cr^{+6}$  iyonları zararlı toksik etkilere yol açar. Manyezit-krom refrakterler bu toksik etkiye sahip olduğu için alternatif manyezit-spinel ve manyezit-hersinit refrakterler geliştirilmiştir. Yapılan bu çalışmada üç farklı tip refrakter malzeme (manyezit-krom, manyezit-spinel ve manyezit-hersinit) üretilmiştir. Üretilen bu üç farklı refrakterin çeşitli fiziksel (yoğunluk, porozite ve mukavemet ve yük altında refrakterlik testi (R.U.L)) ve kimyasal (XRF, XRD) analizleri ve mikroskopik yapıları bir biriyle kıyaslanmıştır. Yapılan testler sonucunda yoğunluk ve porozite değerlerinde önemli bir değişikliğin olmadığı, mukavemet değerinin manyezit-hersinit refrakterde  $75,23$  ( $N/mm^2$ ) değerle en iyi sonucu verdiği ölçülmüştür. Ayrıca  $1450-1500$  °C arasında her üç refrakter malzemenin de kullanılabilir olduğu RUL testinden tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Döner fırın, hersinit, krom, manyezit-spinel, refrakter

## Comparison of properties of basic refractory bricks which use in rotary kiln of cement industry

### ABSTRACT

$Cr^{+6}$  ions that occur during various reactions during the use of basic character refractory materials used in the sinter region of cement rotary kilns cause harmful toxic effects. Since magnesite-chromium refractories have this toxic effect, alternative magnesite-spinel and magnesite-hersinite refractories have been developed. Three different types of refractory materials (magnesite-chrome, magnesite-spinel and magnesite-hersinite) were produced in this work. These produced three different refractories are compared with a variety of physical (density, porosity and strength and refractivity test under load (RUL) and chemical (XRF, XRD) analyzes and microscopic structures. As a result of the tests made, it was measured that there was no significant change in density and porosity values and that the strength value gave the best result with  $75.23$  ( $N/mm^2$ ) value in magnesite-hersinite refractor. It is also determined from the RUL test that all three refractory materials can be used between  $1450-1500$  °C.

**Keywords:** Rotary kilns, hercynite, chrome, magnesite-spinel, refractory

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> SÖRMAŞ AŞ, Bilecik, koray.kaya@sormas.com.tr

<sup>2</sup> Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Met. ve Malz. Müh. Böl., Bilecik, fatih.apaydin@bilecik.edu.tr

## 1. GİRİŞ ( INTRODUCTION )

Kelime olarak “inatçı” manasına gelen refrakterin teknolojik tanımı “yüksek sıcaklıklara ve bu sıcaklıklarda gaz, sıvı ve katı maddelerin fiziksel ve kimyasal etkilerine karşı koyabilen malzeme” olarak yapılabilir [1-4]. Kullanıldığı ortamda termal ve mekanik gerilmelere, yüksek basınç ve sıcaklıktaki gaz ve metal buharlarının etkilerine, sıvı metal ve cürufun korozyonuna (reaksiyonuna) karşı dayanım gösteren, yüksek ergime sıcaklığına sahip malzeme veya malzeme grubuna refrakter malzeme denir [3,4]. Refrakter malzemeler çimento, demir-çelik, cam gibi yüksek sıcaklık prosesi gerektiren ürünlerin üretilmesinde proseslerin vazgeçilmez bir ara girdi grubunu oluşturur.

Çimento sektörü de refrakter malzemelerdeki gelişmeleri yakından takip eden bir sektördür. Çimento, ana hammaddeleri kalkerle kil olan ve mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, briket, vs.) yapıştırmada kullanılan bir malzemedir. Kırılmış kalker; kil ve gerekiyorsa demir cevheri ve/veya kum katılarak öğütülüp toz haline getirilir. Bu malzeme 1400-1500°C' de döner fırınlarda pişirilir. Meydana gelen ürüne "klinker" denir. Daha sonra klinkere % 4-5 oranında alçı taşı eklenip, çok ince toz halinde öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir [1]. Çimento döner fırınlarında sinter bölgesinde yaygın olarak manyezit-krom tuğlalar kullanılmaktaydı. Fakat bu tuğlalar bünyelerindeki krom bileşiklerinden dolayı toksik özelliklere sahiptir. Cr<sup>+6</sup> iyonlarının deride alerji, ülser ve kansorejen etkisinden dolayı endişe yaratması krom içeren refrakter atıklarının Avrupa Birliği kurallarına göre düzenlenmesini gerektirmiş ve dolayısıyla Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermeyen alternatif refrakter ihtiyacı gündeme gelmiştir [6-8]. Bu anlamda yapılan araştırma çalışmaları genel olarak, magnezya-spinel (MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), dolomit ve magnezya-zirkonya tuğlalarının geliştirilmesi üzerinedir. Ancak performansları ve maliyetleri bakımından bu tuğlaların uygulamaları kısıtlanmaktadır.

Ceylantekin ve Aksel yaptığı çalışma, MgO-spinel kompozit refraktere ZrSiO<sub>4</sub> ilavesinin korozyon direncinde artış yaptığını göstermiştir [9]. Aksoy, MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>'e değişen oranlarda ZrSiO<sub>4</sub> +Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve hersinit, ayrıca MgO-Hersinit'e farklı oranlarda MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ve ZrSiO<sub>4</sub> katkılarının ilave edilmesiyle ürettiği malzemelerin mekanik özelliklerini incelenmiş ve

bu katkı gruplarının ilavesinin ısıl şok ve korozyon direncinde önemli derecede iyileştirme sağladığını tespit etmiştir [10]. Aksoy ve arkadaşları hersinit ilaveli MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> kompozit refrakterlerin mikro yapısal özellikleri ile mekanik özellikleri arasındaki ilişkiyi detaylı bir şekilde incelemişler. Mekanik özellikleri artıran parametreleri; i) yapıda oluşan mikro çatlakların katkı tanelerinin bir birlerine bir ağ şeklinde bağlanarak dallanması, sapması veya gözeneğe ve katkı ilavelerine ulaştığında durması, ii) kırılma tipinin katkı ilaveleriyle tane içi kırılmadan taneler-arası kırılmaya doğru dönüşme göstermesi, iii) kristal tane boyutunun MgO'e göre artan katkı ilaveleriyle önemli ölçüde azalması, iv) yoğunluk değerlerinin katkı miktarıyla yükselmesi şeklinde belirtmişlerdir. [11].

Bu çalışmada üretilen üç farklı tip refrakter malzemenin (manezit-krom, manyezit-spinel ve manyezit-hersinit) çeşitli fiziksel (yoğunluk, porozite ve mukavemet ve yük altında refrakterlik testi (R.U.L)), kimyasal (XRF, XRD) analizleri ve mikroskobik yapıları bir biriyle kıyaslanarak bir birine göre üstünlük veya zayıf noktaları ortaya konmuştur.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

### 2.1. Refrakterlerin üretilmesi (Production of refractories)

Deneysel çalışmalarda kullanılan 3 farklı refrakter malzeme Tablo 1'de belirtilen karışımlar kullanılarak üretilmiştir. Üretilen refrakterler ticari ürün olduğu için bileşenlerin oranları verilmemiştir. Tablo 1'de verilen hammaddelere göre harman hazırlama esnasında kullanılan hammaddeler 0-7 mm aralığındadır. % 2-3 oranında kimyasal bağlayıcı kullanılmıştır. Harmanlar 1250 kg olarak Eirich mikserlerde 10-15 dakika karıştırılarak hazırlanmıştır. Harman hazırlama işlemi tamamlandıktan sonra, 2000 tonluk LAİES HPF III hidrolik preste, 1500 kg/cm<sup>2</sup>'lik basınçla tuğlalar şekillendirilmiştir. Şekillendirmeyi takiben 150-180 °C aralığında tünel kurutma fırınında rutubetlerini attıktan sonra Manyezit-Krom tuğla 1400 °C'de, Manyezit-MA Spinel tuğla 1600 °C'de Manyezit-Hersinit tuğla ise 1550 °C sıcaklığında tünel fırında pişirilmiştir.



Tablo 1. Deneylerde kullanılan refrakter malzemelerin bileşenleri (Components of refractory materials used in experiments)

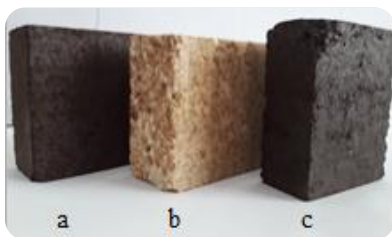
Hammadde	Manyezit-Krom	Manyezit-Spinel	Manyezit-Hersini
Alpin Sinter Manyezit	x		x
Demirli Sinter Manyezit			x
Deniz Suyu Sinter Manyezit		x	
Fused Manyezit		x	
Kromit	x		
Sinter Spinel		x	
Hersinit			x

Kullanılan hammaddelerin kimyasal analizleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Hammadde kimyasal analizleri (XRF). (Raw material chemical analysis)

%	Alpin S.M.	Demirli S.M.	Deniz suyu S.M.	Fused M.	Kromit	Sinter Spinel	Hersinit
MgO	88,08	90,25	98,32	96,27	17,59	33,03	1,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,55	6,16	0,41	0,75	14,77	0,21	42,57
SiO <sub>2</sub>	0,56	0,81	0,13	0,81	2,56	0,19	0,56
CaO	2,53	1,65	0,67	1,54	0,31	0,43	0,18
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,21	0,25	0,14	0,18	14,83	66,07	54,81
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					48,94		
B.D. (g/cm <sup>3</sup> )	3,30	3,35	3,43	3,45	>4	3,30	3,75
L.O.I	0,2		0,1	0,1	0,5	0,1	0,03

Şekil 1’de üretilen ve test ve analizlerde kullanılan üç farklı refrakter malzemenin fotoğraf görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan refrakter görüntüleri ( a) MgO- Krom, b) MgO-Spinel c) MgO-Hersinit ) (Refractory photographs used in the study)

## 2.2. Test ve analizler (Tests and analyzes)

Silindir şeklinde 100 cm<sup>3</sup> hacminde hazırlanan numunelere daldırma sıvısı olarak ayçiçek yağının kullanıldığı ortamda ASTM C0830 standardına uygun olacak şekilde yoğunluk, su emme ve görünür porozite tayini yapılmıştır.

ASTM C0133’e uygun olarak soğukta kırılma dayanımı (C.C.S) için test numuneleri 50x50x50 mm boyutlarında kesilerek 300 °C’de 2 saat kurutulmuştur. Daha sonra 600 KN kapasiteli Tanitechnic cihazında test numunesi kırılıncaya kadar numuneye uygulanan yük düzenli olarak artırılarak numune kırılmıştır. Uygulanan maksimum yük kaydedilerek aşağıdaki gibi hesaplanmıştır. (1)’in eşitlikte belirtildiği şekilde maksimum gerilme hesaplanmıştır.

$$\sigma_{max} = (F_{max}/A) \quad (1)$$

F<sub>max</sub> : Uygulanan maksimum yük (N), A : Yükn uygulandığı kesit alanı (mm<sup>2</sup>)

Numuneler 63 µ altına öğütülerek ve eritiş cihazında eritilerek AMATEK firmasının Spectroxeos modeli XRF cihazında kimyasal analize tabi tutulmuştur.

Ürünlerin yük altında refrakterlik (R.U.L) testi DIN EN 993-8 standardına uygun olarak Netszch marka cihaz ile hava atmosferinde 0,2 MPa sabit yük altında 5 C°/dak ısıtma hızıyla yapılmıştır.

Elde edilen ürünlerin karakterizasyonu Anadolu Üniversitesi, Seramik Araştırma Merkezinde (SAM) bulunan SEM (ZEISS EVO 50EP) cihazında 20kV hızlandırma voltajı ile 10-20 mm çalışma yüksekliğinde yapılmıştır. Karakterizasyon çalışmasının efektif sonuç vermesi için hem ikincil elektron görüntüleri (SEI) hem de geri saçılımlı elektron görüntüleri (BEI) kullanılmıştır. Böylece boyut ve biçimsel incelemeler yapılırken aynı zamanda ikincil fazlar ve bunların dağılımıyla ilgilide bilgi sahibi olunmuştur.

Tuğla numuneleri Fritsch marka halkalı öğütücüde 63 mikron altı olacak şekilde 5 dakika öğütüldükten sonra XRD analizi için hazır hale gelmiştir. XRD analizi, Anadolu Üniversitesi SAM’da (Rigaku RINT2000) Cu K radyasyonu ile 2θ 5-70 ° aralığında 2°/dk. çekim hızı ile faz analizi yapılmıştır.

### 3. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

#### 3.1. Yoğunluk, Porozite, Mukavemet Testleri (Density, Porosity, Strength Tests)

Tablo 3’de numunelerin hacim ağırlık, porozite ve mukavemet değerlerini belirten test sonuçları verilmiştir.

Tablo 3. Fiziksel test sonuçları. (Physical test results)

	Hacim Ağırlık (g/cm <sup>3</sup> )	Porozite (%)	$\sigma_{max}$ (N/mm <sup>2</sup> )
MgO-Krom	2,95	17,56	60,96
MgO-Spinel	2,96	16,43	65,44
MgO-Hersinit	2,99	16,21	75,23

Aksoy ve arkadaşları [11] MgO içerince ağırlıkça %5, %10 ve %20 arasında MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel ilave edilen kompozisyonlara %5, %10 ve %20 arasında hersinit katkısı yaparak reçeteler hazırlamıştır. Bunların yapığı çalışmada MgO’ e spinel ilave edilmesinin üretilen MgO-spinel kompozit refrakter malzemelerin yoğunluk ve açık gözenek miktarlarında önemli bir değişiklik yapmadığını (2,95-2,97 g/cm<sup>3</sup>) MgO-spinel-hersinit kompozit ilavesi edilenlerin daha yoğun değerlerde (3,0-3,1 g/cm<sup>3</sup>) olduğunu belirtmişlerdir. Ceylantekin ve Akselin yaptığı çalışmada [9] MgO-Spinel’e ZrSiO<sub>4</sub> ilavesinin yoğunluğu artırdığı belirtilmiştir. Tablo 3’de belirttiğimiz deney sonuçları yukarıda belirtilen literatürle uyumlu sonuçlar vermiştir. Tablo 3’de MgO, MgO-Spinel refrakterlerin yoğunluklarının birbirine çok yakın değerde olduğu (2,95-2,96 g/cm<sup>3</sup>), MgO-hersinit refrakterde yoğunluk değerinin diğerlerinden biraz daha yüksek olduğu (2,99 g/cm<sup>3</sup>) görülmektedir. Aksoy ve arkadaşları yine aynı çalışmada bu karışımlarla üretilen ürünlerin mukavemet değerlerini de incelemiş olup MgO’ e spinel ve hersinit ilave miktarların artışının mukavemet değerini düşürdüğünü bunun nedeniyle muhtemelen ilave elementlerinin ısı genleşme katsayılarındaki farktan kaynaklandığını belirtmiştir. Tablo 3’de görülen sonuçlarda MgO’ e sırasıyla krom, spinel ve hersinitin ayrı ayrı katılması durumunda ise mukavemet değerleri sırayla 60,96-65,44 ve 75,23 (N/mm<sup>2</sup>) artış göstermiştir. Buradaki artışın nedeni muhtemelen MgO’ e katkı ilavesinin mukavemeti artırmasıdır.

#### 3.2. Kimyasal Analiz Sonuçları (Chemical test results)

Şekillendirme ve sinterleme sonrasında üretilen ürünlerin kimyasal analizleri sonuçları (XRF) Tablo 4’de verilmiştir. Kimyasal analiz sonuçları, MgO-krom refrakterin ana bileşeninin %80,06 MgO ile %6,05 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’den, MgO-Spinel refrakterin ana bileşeninin %88,74 MgO ile %9,63 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’den, MgO-hersinit refrakterinin ana bileşeninin %85,12 MgO ile %8,02 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>’den oluştuğunu göstermektedir.

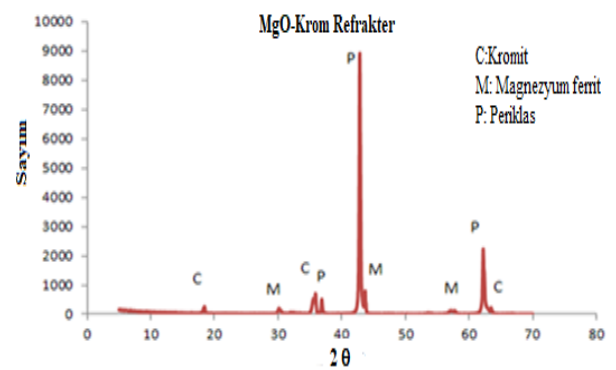
Tablo 4. Kimyasal analiz sonuçları (XRF). (Chemical analysis results XRF)

	MgO-Krom	MgO-Spinel	MgO-Hersinit
MgO	80,06	88,74	85,12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,12	9,63	3,45
SiO <sub>2</sub>	1,13	0,36	0,91
CaO	2,38	0,72	1,77
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,96	0,51	8,02
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,05	-	-

#### 3.3. SEM Görüntüleri ve XRD Analizleri (SEM Images and XRD Analysis)

##### 3.3.1. MgO-Krom Refrakter

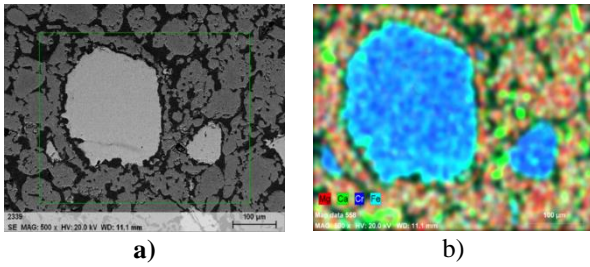
Şekil 2’de gösterilen ait XRD analizinde MgO-krom refrakterinin kromit, magnezyum ferrit ve camısı periklas fazlarından oluştuğu görülmektedir.



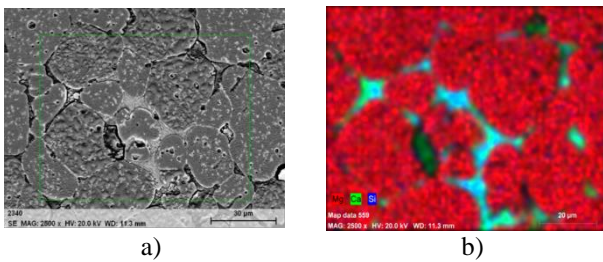
Şekil 2. MgO- Krom refrakterin XRD analizi ( MgO-Chromium refractory XRD analysis )

Şekil 3 ve Şekil 4’de Manyezit-Krom refrakterine ait kromit tanesinin ve tane sınırlarının SEM ve mapping görüntüleri verilmiştir. Kromit taneleri refrakter içerisinde belirgin bir şekilde ayırt edilebilmektedir. Tane sınırlarında ise MgO-Cr refrakterde diğer incelenen refrakterlere göre MgO içeriği daha düşük dolayısıyla safsızlık değeri yani

CaO ve SiO<sub>2</sub> daha yüksek olduğu için tane sınırları arasında oluşan kalsiyum silikat fazları net bir şekilde görülmektedir.



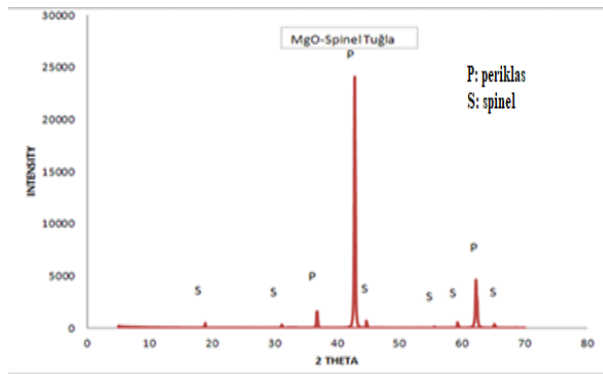
Şekil 3. MgO-Cr refrakter içindeki kromit tanesi (a: SEM görüntüsü, b: Mapping analizi) (Chromite grain in MgO-Cr refractory (a: SEM image, b: Mapping analysis))



Şekil 4. MgO-Cr refrakterde periklas taneleri arasında oluşan camsı faz (a: SEM görüntüsü, b: Mapping analizi). (The glassy phase formed between periclase grains in MgO-Cr refractory (a: SEM image, b: Mapping analysis))

### 3.3.2. Manyezit-Spinel Refrakter

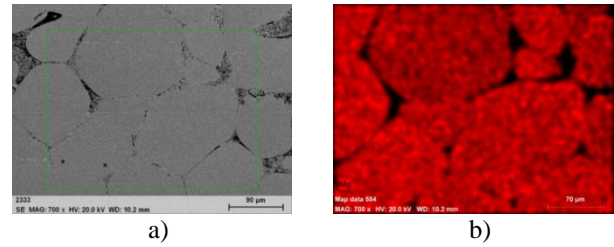
Şekil 5’de gösterilen XRD analizinde MgO-spinel refrakterinin periklas ve spinel fazlarından oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5. MgO- Spinel refrakterin XRD analizi ( MgO-Spinel refractory XRD analysis )

MgO-Spinel refraktere ait SEM ve mappin görüntüsü Şekil 6’da gösterilmiştir. Aksoy [10] yaptığı çalışmada irili ufaklı spinel (açık gri) tanelerinin, MgO tanelerinin hem içinde ve hem de tane sınırlarında bulunduğu gözlemiştir. Ayrıca tane sınırlarında monticellit (CaMgSiO<sub>4</sub>) fazının bulunduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde bu çalışmada da MgO-spinel periklas taneleri tuğlaya

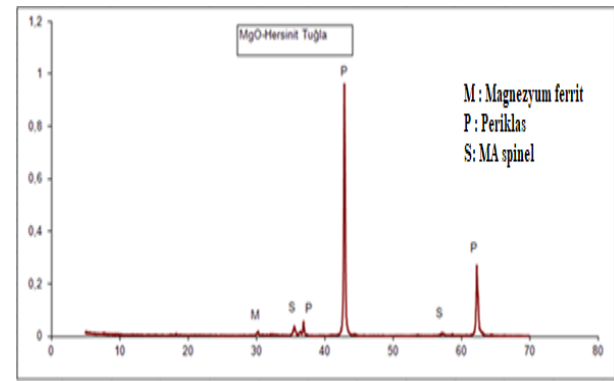
homojen bir şekilde dağılmıştır. Spinel refrakter üretiminde yüksek saflığa sahip deniz suyu sinter manyeziti kullanıldığı için bu refrakterde manyezit-krom refraktere oranla daha az kalsiyum silikat fazı oluşumu vardır.



Şekil 6. MgO-Spinel tuğlada periklas taneleri (a: SEM görüntüsü, b: Mapping analizi). (MgO-Spinel refractory periclase grains (a: SEM image, b: Mapping analysis))

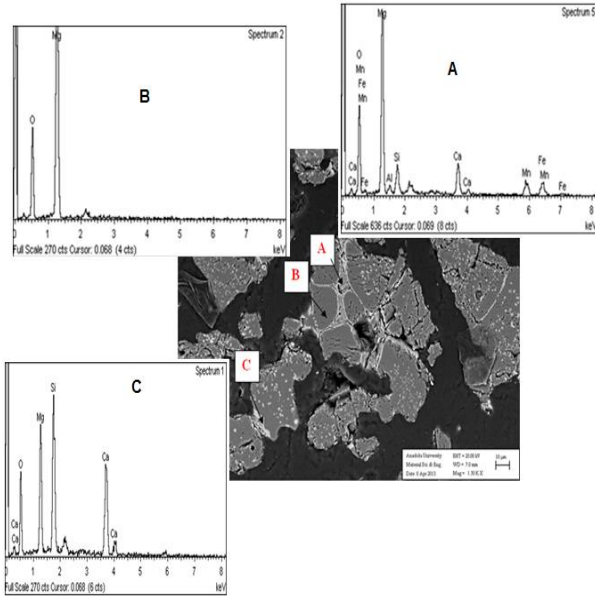
### 3.3.3. Manyezit-Hersinit Refrakter

Şekil 7’de gösterilen XRD analizinde MgO-hersinit refrakterinin magnezyum ferrit, periklas ve spinel fazlarından oluştuğu görülmüştür.



Şekil 7. MgO- Spinel refrakterin XRD analizi ( MgO-Spinel refractory XRD analysis )

Şekil 8’de gösterilen MgO-Hersinit Tuğlanın SEM görüntüsünde A, B ve C noktalarında EDX kimyasal analiz yapılmıştır. Bu noktalarda; A noktasının Ca-Si fazı içerdiği ve periklas tanelerinin arasında olduğu, B noktasında periklas tanelerinin yapısı, C noktasında ise hersinit taneleri olduğu görülmüştür.

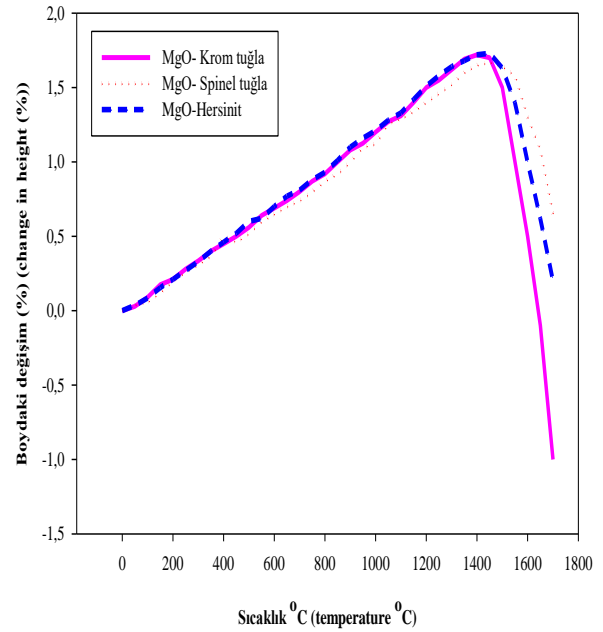


Şekil 8. MgO-Hersinit tuğla SEM görüntüsü ve EDS analizi. (MgO-Hersinite refractory SEM image and EDS analysis)

### 3.4. Yük altında refrakterlik testi (R.U.L) (Refractoriness under load test)

Yük altında refrakterlik testi, refrakter tuğlanın servis esnasında sıcakta ve yük altında yumuşamaya başladığı noktayı öngörmek amacıyla deformasyon tespiti için yapılan bir testtir. Bu testte sırasıyla T<sub>0,5</sub>, T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub> ve T<sub>5</sub> değerleri deformasyonun %0,5, %1, %2 ve %5 olduğu sıcaklıklardır. Tuğla tiplerinin R.U.L testlerinin sonuçları birbirine göre karşılaştırılırken T<sub>0,5</sub> değerleri referans olarak alınan değerdir.

Çalışmada kullanılan tuğlalarda çıkan test sonuçları Şekil 9'da ve Tablo 5'de verilmiştir. Manyezit-krom tuğlada kullanılan ana hammadde Alpin sinter manyeziti olduğundan dolayı bu malzeme Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerdiği için buna bağlı olarak beklenen yönde R.U.L sonucu düşük gelmiştir. Manyezit-spinel tuğlada ise ana hammadde deniz suyu sinter manyezitidir ve yüksek saflıktadır. Bu özelliklerinden dolayı beklenen yönde R.U.L analiz sonucu en yüksektir. Manyezit-hersinit tuğlada da hemen hemen Manyezit-krom tuğladaki ile aynı oranda Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içerdiğinden fakat diğer oksitlerden MgO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oranları Manyezit-spinele yakın olduğundan dolayı R.U.L sonucu her iki kalite arasında kaldığı görülmektedir.



Şekil 9. Refrakterlerin yük altında refrakterlik testi (RUL). (Refractoriness under load test)

Tablo 5. R.U.L testi sonuçları. (R.U.L test results)

	T <sub>0,5</sub> (°C)	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>5</sub> (°C)	D <sub>maks</sub>
MgO - Krom	1532	1580	1657	>1700	1400 °C =% 1,71
MgO- Spinel	>1700	>1700	>1700	>1700	1450 °C =% 1,67
MgO- Hersinit	1576	1638	>1700	>1700	1428 °C =% 1,73

Çimento döner fırınlarında sinter bölgesinde çalışma sıcaklığı 1450-1500°C olduğundan dolayı 3 tuğlanın da bu bölgede kullanmaya uygun olduğu görülmüştür.

## 4. SONUÇLAR (RESULTS)

Yapılan çalışmalar sonucunda her üç tip tuğla içinde yapılan karakterizasyon test analizleri sonucunda tuğla tiplerinin kullanım ömrünü ortaya koyabilecek önemli farklar görülmemiştir.



Yapılan çalışmalarda MgO-krom refrakterinin kromit, magnezyum ferrit ve periklas fazlarından, MgO-Spinel refrakterinin MA spinel, periklas fazlarından MgO-hersiinit refrakterinin ise magnezyum ferrit, periklas ve spinel fazlarından oluştuğu görülmüştür. Bu her üç refrakterde de refraterliği kötü yönde etkileyecek düşük ötektik noktasına sahip fazların bulunmadığı görülmüştür.

Yapılan fiziksel testler sonucunda yoğunluk ve porozite de belirgin farklar olmazken mukavemet değerleri sırasıyla MgO-krom 60,96 N/mm<sup>2</sup>, MgO-spinel 65,44 N/mm<sup>2</sup> ve MgO-hersiinit 75,23 N/mm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür.

Yapılan RUL testi sonucunda döner fırınlarında sinter bölgesinin çalışma sıcaklığı 1450-1500 °C olduğu için her üç refrakterin bu bölgede kullanılmasının uygun olduğu tespit edilmiştir.

## REFERENCES

- [1] B. Şimşek, E. H. Şimşek, T. Altunok, “Bir Çimento Döner Fırın Sistemi Yüzeyinden Isı Kayıplarının Ampirik ve İstatistikî Modellenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, cilt 28, no. 1, pp. 59-66, 2013.
- [2] DPT, “Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Taş ve Toprağa Dayalı Ürünler Sanayii Özel İhtisas Komisyonu Raporu (Refrakter) Çalışma Raporu”, Ankara, 2001.
- [3] A. Dombaycı, “Alümina-Spinel-Zirkonya ile Çimentosuz Kendi Kendine Akabilen Dökülebilir Refrakter Geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
- [4] C. Neşet, “Cam Fırınlarına Yönelik Zirkonya Mullit Esaslı Dökülebilir Refrakter Betonlarının İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
- [5] S. Yarbil, “Refrakter Tuğla Üretiminde Kullanılan Hammaddelerin ve Refrakter Tuğlaların Bazı Teknolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [6] P. S. Gruver, “Magnesia Spinel Refraktor Brick”. US Patent No: 6261983 B1, 2001.
- [7] J. Chen, M. Yan, J. Su, B. Li, J. Sun, K. Chou, X. Hou, “Effect of SiO<sub>2</sub> addition on the synthesis of hercynite with high purity”, *Journal of The Ceramic Society of Japan*, cilt 123, no. 7, pp. 595-600, 2015.
- [8] S. Üstünbaş , İ. İnel ve M. Albayrak, “Refrakterlerin Parlayan Yıldızı Spinel”, 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 1997.
- [9] R. Ceylantekin ve C. Aksel, “Mg-O Spinel Kompozit Rekrakterlere ZrSiO<sub>4</sub> İlavesinin Korozyon Davranışına Etkisi”, *Anadolu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi -A*, cilt 11, no. 2, pp. 103-114, 2010.
- [10] T. Aksoy, “ZrSiO<sub>4</sub>-ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> İlaveli MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> ile MgO-FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Kompozit Refrakter Malzemelerin Mekanik Özellikleri, Isıl Şok ve Korozyon Davranışları”, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2012.
- [11] T. Aksoy, C. Aksel, T. Kavas, “Hersiinit İlaveli MgO-MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Kompozit Refrakterlerin Mekanik Özelliklerinin ve Mikroyapısal Karakteristiklerinin İncelenmesi”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, no. 14, pp. 525-529, 2014.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 20-09-2016 <u>Kabul/Accepted</u> 16-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.340009	

## Carbon footprint studies on Esentepe Campus of Sakarya University, Turkey in 2015

Ratha Sreng<sup>1</sup>, Mahnaz Gümrükçüoğlu Yiğit<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

The carbon footprint calculation of a university is considered a model role for the rest of other organizations to follow. It is because that a university is full of talented people with diverse experience, advanced research facilities and it consists of many resources that we need to measure, manage and report greenhouse gas (GHG) emissions [1]. In this study, tier 1 methods of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and setting boundaries method of the World Resources Institute (WRI) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) are applied for calculating GHG emissions from Esentepe Campus of Sakarya University (SAU) in 2015. In the calculation of this study, the last updated Global Warming Potential (GWP) from the IPCC Fifth Assessment Report, 2014 was used for converting greenhouse gases into CO<sub>2</sub> equivalent [2]. As a result, Esentepe Campus of Sakarya University released 12,330.73 tons of CO<sub>2</sub> equivalents (Expressed as tCO<sub>2</sub>e) and scope 2 indirect emissions of purchased electricity is the most important emission source, followed by emissions from student and employee commuting. In order to reduce CO<sub>2</sub> on Campus, some solutions are also suggested for efficiently consuming electricity and energy.

**Keywords:** carbon footprint, greenhouse gas emissions, IPCC, setting boundaries, Global Warming Potential.

### Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü 2015 yılı karbon ayakizi çalışması

### ÖZ

Bir üniversitenin karbon ayakizinin hesaplanması benzer organizasyonlar için bir model oluşturmaktadır. Bir kampüste farklı ve çeşitli tecrübelerle sahip yetenekli insanlar, gelişmiş araştırma binaları bulunduğu ve çeşitli seragazı kaynakları içerdiği için sera gazı emisyonlarının ölçülmesi, yönetimi ve raporlanması önem arz etmektedir [1]. Bu çalışmada, Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsünün 2015 yılı seragazı emisyonları Hükümetler Arası İklim Değişikliği Paneli'nin (IPCC) tier 1 metodu ve World Resources Institute (WRI) nin sınır belirleme metodu ve World Business Council for Sustainable Development'ın metodları kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda, 2014 yılı IPCC beşinci değerlendirme raporundaki küresel ısınma potansiyeli, seragazılarını karbondioksit (CO<sub>2</sub>) eşdeğerine çevirmek için kullanılmıştır [2]. Sonuçta, Sakarya Üniversitesi Esentepe Kampüsü'nden 12,330.73 ton CO<sub>2</sub> eşdeğeri seragazı açığa çıktığı ve dolaylı emisyon olarak değerlendirilen elektrik tüketiminden kaynaklanan emisyonların en önemli emisyon kaynağını oluşturduğu, bunu öğrenci ve çalışanlardan kaynaklanan emisyonların izlediği bulunmuştur. Kampüsteki CO<sub>2</sub> nin azaltılması için özellikle enerji tüketiminde verimlilik için bazı çözümler önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** karbon ayakizi, seragazı emisyonu, IPCC, sınır belirleme, küresel ısınma potansiyeli

<sup>1</sup> Yazar 1 Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Y.Lisans, Sakarya, Türkiye

<sup>\*</sup> Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mahnaz Gümrükçüoğlu Yiğit ([mahnaz@sakarya.edu.tr](mailto:mahnaz@sakarya.edu.tr))

<sup>2</sup> Yazar 2: Sakarya Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

## 1. INTRODUCTION

Human activities mainly take responsibility for the release of carbon footprint, namely, greenhouse gases into the atmosphere. As a result, humanity and the natural world would face major threats posed by runaway climate change. However, we can avoid these consequences by reducing emission quantities of individual gases (GHG) with the measurement of Carbon Dioxide Equivalents using the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 100-year Global Warming Potential (GWP) factors [3]. In addition, the potential effects on climate change from different activities can be evaluated on common basis of calculation. In this study, the GHG emissions from each activity within institutional boundaries were converted to CO<sub>2</sub>e [3]. Totally, there are 18 greenhouse gases with different global warming potentials. But under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) and its Kyoto protocol, there are only six categories of greenhouse gases, which are considered for the purpose of carbon accounting: carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>), nitrous oxide (N<sub>2</sub>O), hydrofluorideperfluoro carbon (HFC) and perfluoro carbon (PFC), and sulfur hexafluoride (SF<sub>6</sub>) [4].

Similarly, carbon footprint calculation applying Tier 1 and setting boundaries methods are generally carried out by many institutions, such as the case studies of “Carbon Footprint of Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Salaya Campus, Thailand” [5] and “A New Method of Assessment and Equations on Carbon Footprint, Sir Parshurambhau College, India” [6] and “Exploring the applications of carbon footprinting towards sustainability at a UK university” [7]. Those studies were show similar results with our study that universities released similar tons of CO<sub>2</sub> equivalents. It means, electricity consumption was most important factor on carbon foot print in campus.

In Turkey, Bogazici, Istanbul Technical, Ege and Nişantaşı Universities were make some plan or activities for reducing of carbon footprint in their campus, but there is no detail calculation study about campus carbon footprint. In addition, there is a study on Akdeniz University just for Health Services about determination of carbon foot print. This study also was not directly compare with our study because of different method. Although,

electricity consumption was most important factor on carbon foot print in Akdeniz University Health Services just as Sakarya University Campus. [8]

## 2. METHODOLOGY

### 2.1. Setting Campus Boundaries

The GHG inventory was done on Sakarya University’s Esentepe campus located in Serdivan, which includes 834,444 m<sup>2</sup> of occupied areas comprising classrooms, laboratories, libraries, residence halls, dining facilities, athletic and recreational facilities, performance centers, office buildings, and others. In 2015, there were 79,708 students and 2,028 employees on SAU campus. With this number of students and employees, we were allowed to calculate intensity of carbon emissions per capita and per square meter [4].

### 2.2. Emission Sources and Scopes

To study the campus carbon footprint, either direct or indirect emissions are taken into account. The emissions from sources on campus or institution are called direct GHG emissions and consequences of emissions outside campus or institution are indirect GHG emissions, which are from sources owned or controlled by another company [9]. In this study, three scopes of direct and indirect GHG emissions were applied as follows [9]:

- Scope 1: direct emissions: On-campus stationary fuel source (natural gas usage for heating and cooling)
- Scope 2: indirect emissions: Purchased electricity
- Scope 3: other indirect emissions: Student and employee commute between work and home activities, wastewater, water supply, solid waste, and used paper.

### 2.3. Spacing

All data needed for calculating GHG emissions on SAU Esentepe campus was collected from SAU administrative offices for the calendar year of 2015. Some data was divided by 12 in order to get the average value for one year, such as average of commuting distance, number of students and employees. We needed to use the average value because number of students and employees and distance of commuting were changed from month to month.

## 2.4. Calculation

The calculation method of GHG emissions provided by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was used in the study [10]. This method simply used the multiplication of between activity data and relevant emission factors

(Emission = Activity Data x Emission Factor ).

In addition, the Tier 1 of IPCC was chosen to carry out the calculation of GHG emissions with default emission factors given by various sources as shown in table 1 of emission factors [8]. Moreover, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O were converted to tCO<sub>2</sub>e by using the last updated Global Warming Potential (GWP) values: (tCO<sub>2</sub>e = 1 × CO<sub>2</sub>), (tCO<sub>2</sub>e = 28 × CH<sub>4</sub>) and (tCO<sub>2</sub>e = 265 × N<sub>2</sub>O). [11], [12], [13].

## 3. RESULT FOR SAU ESENTEPE CAMPUS

In 2015, SAU Esentepe campus emitted 12,330.73 tons of CO<sub>2</sub> equivalents. This result is received by using relevant emission factors and activity data, which are mentioned in table 1 and table 2, respectively:

Table 1: Emission factors for conversion

GHG Emissions Sources	Emission Factors	Unit/Gases
Bus, diesel using engine	2.743243243	Kg/mile CO <sub>2</sub> [9]
Bus, diesel using engine	0.0051	g/mile CH <sub>4</sub> [9]
Bus, diesel using engine	0.0048	g/mile N <sub>2</sub> O [9]
Minibus, diesel using engine	0.62654321	Kg/mile CO <sub>2</sub> [9]
Minibus, diesel using engine	0.001	g/mile CH <sub>4</sub> [9]
Minibus, diesel using engine	0.0015	g/mile N <sub>2</sub> O [9]
Passenger car, gasoline using engine	0.391555556	Kg/mile CO <sub>2</sub> [9]
Passenger car, gasoline using engine	0.0147	g/mile CH <sub>4</sub> [9]
Passenger car, gasoline using engine	0.0079	g/mile N <sub>2</sub> O [9]
Natural gas	1.88496	Kg/m <sup>3</sup> CO <sub>2</sub> [10]
Natural gas	0.000168	Kg/m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> [10]
Natural gas	0.00000336	Kg/m <sup>3</sup> N <sub>2</sub> O [10]
Wastewater	0.3	(Kg/liter) CH <sub>4</sub> [11]
Wastewater	0.005	(KgN <sub>2</sub> O-N)N <sub>2</sub> O[11]
Water supply	0.0014	Kg CO <sub>2</sub> e/l [6]
Electricity	0.856	Kg CO <sub>2</sub> e/kWh [6]

Solid waste	0.021	Kg CO <sub>2</sub> e/Kg [6]
Paper	0.928	Kg CO <sub>2</sub> e/Kg [6]

Table 2: Inventories and Activity data

Inventories	Activity Data
Campus area, m <sup>2</sup>	834,444
Number of trees on campus	850
Distance of student and employee commuting, Km	20.39
Number of students and employees	81,737
Number of buses	31,286
Number of minibuses	61,275
Number of passenger cars	30,637
Natural gas used for heating and cooling, m <sup>3</sup>	1,065,711
Amount of wastewater, liter	33,475
Amount of water supply, m <sup>3</sup>	115,405
Amount of used electricity, Kwh	9,416,085
Amount of solid waste, ton (t)	388.95
paper usage, Kg	7,953

During the calculation, all different units were converted into the same standards. For example, 1.609344Km is chosen for 1mile, 1g is equivalent to 0.001Kg, and 1m<sup>3</sup> is for 1000liters of water. By using the same standard of units, then, each of the result was converted into tCO<sub>2</sub>e complied with the last updated Global Warming Potential (GWP) values, which are shown in table 3, from the IPCC Fifth Assessment Report, 2014 (AR5) [2]. As a result, amount of GHG scope emissions in tCO<sub>2</sub>e was obtained and is illustrated in table 4 and figure 1 according to the GHG Protocol.

Table 3: GWP potential values relative to CO<sub>2</sub>:

CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	28
N <sub>2</sub> O	265

Table 4: GHG emissions sources in tCO<sub>2</sub>e

Scopes	Direct and Indirect Emissions	Emissions CY 2015 tCO <sub>2</sub> e
Scope 1	Direct emissions from natural gas usage, stationary combustion	2,014.78
Scope 2	Indirect emissions from purchased electricity	8,060.17
Scope 3	Other indirect emissions	2,255.78
	Student and employee commuting	1,727.77
	Wastewater	350.89
	Water supply	161.57
	Solid waste	8.17
	Used paper	7.38



In addition to having GHG emissions from the scopes, the emissions of all major sources are also presented in percentage in figure 1, figure 2, and in tCO<sub>2</sub>e in figure

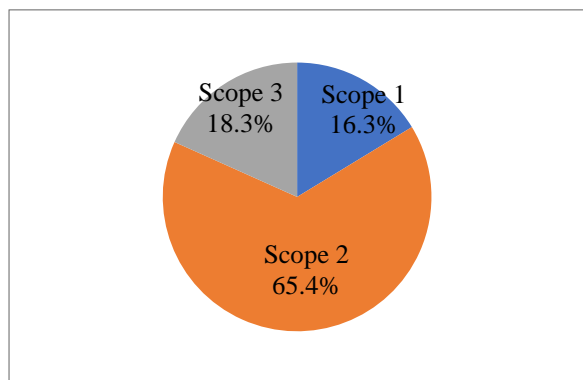


Figure 1: Breakdown of GHG emissions by scopes in percentage

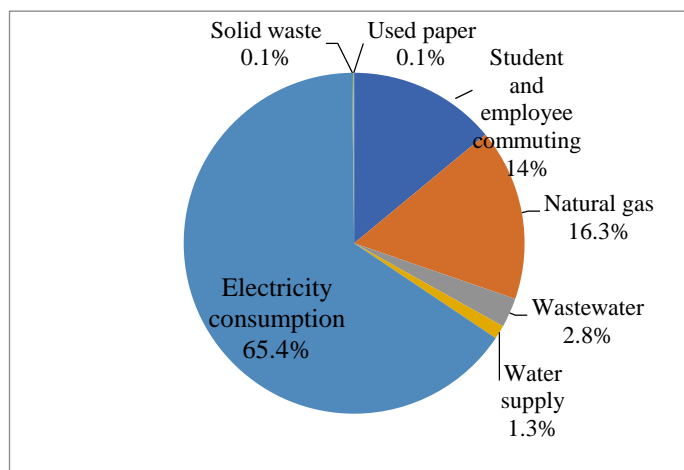


Figure 2. Contribution of major sources for the Esentepe Campus GHG emissions in percentage

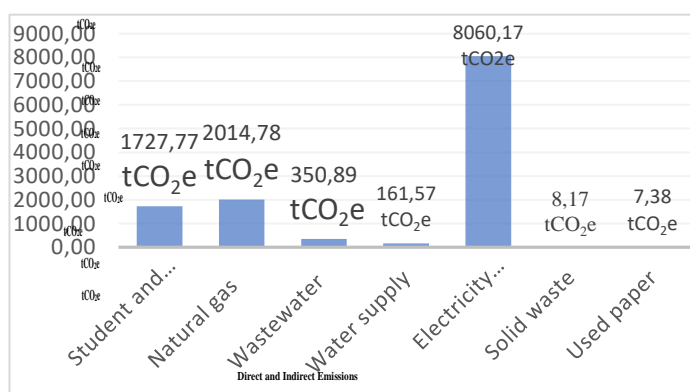


Figure 3. GHG emissions from major sources in tCO<sub>2</sub>e

By receiving total amount of tCO<sub>2</sub>e emitted by Esentepe Campus, we are also allowed to check out intensity of carbon emissions per square meter and per capita [4], which is demonstrated in table 5.

Table 5: Intensity of carbon emissions

Intensity Metrics	2015
Floor Area	834,444
Tons CO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	0.015
Population	81,737
Tons CO <sub>2</sub> e/capita	0.151

In terms of intensity of carbon emissions, the emissions per square meter and per capita for 2015 are 0.015tCO<sub>2</sub>e and 0.151tCO<sub>2</sub>e, respectively. Additionally, trees can capture CO<sub>2</sub> from the atmosphere, and a single tree can absorb CO<sub>2</sub> at a rate of 22 Kg per year [14]. There are already 850 trees on campus, so it can help reduce 18.7 tons of CO<sub>2</sub>. The amount of absorbing CO<sub>2</sub> will be much higher than that, if more trees are planted on campus of Sakarya University.

#### 4. CONCLUSION AND SUGGESTIONS



In 2015, Esentepe Campus of Sakarya University emitted 12,330.73 tCO<sub>2</sub>e, in which the electricity consumption was the most CO<sub>2</sub> emitting source, and it accounted for 65.4%. Natural gas usage was responsible for the second place with 16.3% of the total emissions. The least emitting sources were solid waste and used paper, which had almost the same amount of tCO<sub>2</sub>e. In other words, the scope 2 emissions shared more than 50% of the total emissions, followed by the scope 3 and the scope 1 emissions. If this study compare to other studies, Sakarya University Campus Footprint is similar to other campuses and also electricity consumption was most important factor on carbon footprint just as other university campus. By the way, it is acknowledgeable that the total amount of CO<sub>2</sub>e emitted by Esentepe Campus was not totally accurate. Lack of data from some resource consumptions was one of the challenges for calculating the exact amount of the GHG emissions. Additionally, the emission factors used in the study were taken from three different sources and may affect the outcomes of emissions as well.

It is clear that the usage of fossil fuel, such as coal, oil, natural gas, and gasoline to generating electricity and combustion processes is the factor that leads to emit a huge amount of greenhouse gases, particularly CO<sub>2</sub>, which is the most long lived gas compared with other 5 greenhouse gases recognized by the Kyoto Protocol in the atmosphere. However, it is not impossible to find a solution to deal with those emissions from the

electricity consumption and combustion. Simply, electricity generated from fossil fuel should be replaced by using alternative energy, such as electricity generated from renewable energy. Other ways to reduce amount of GHGs emitted by electricity consumption is to raise awareness of energy savings or to use energy-efficient light bulbs with models that have earned the Energy Star within campus buildings. Regarding the emissions from both stationary and mobile combustions, the energy efficiency should also be increased. On top of that, Tree carbon sequestration is another simple way to reduce amount of CO<sub>2</sub>. This is why reforestation is being focused on the campus. Moreover, to reduce campus carbon footprint, Sakarya University has its new environmental policy, which includes working on energy efficiency, building wind turbines, and waste management studies, and all of these studies will be adopted in the near future.

## REFERENCES

- [1] Clean Air Cool Planet, Campus Carbon Calculation, Users guide, Version 6.0, 2008.
- [2] World Resources Institute (WRI), Global Warming Potential Values, The Greenhouse Gas Protocol, 2015.
- [3] Terrie K. Boguski, "Life Cycle Carbon Footprint of the National Geographic Magazine", *Int J Life Cycle Assess*, vol. 15, pp. 635-643, 2010.
- [4] S. Rippon, A. Dane, "University of Cape Town Carbon Footprint for 2013", CapeTown, USA, Report, 2014.
- [5] S. Aroonsrimorakot, C.Yuwaree, C. Arunlertaree, R.Hutajareorn and T. Buadit, "Carbon Footprint of Faculty of Environment and Resource Studies, Mahidol University, Salaya Campus, Thailand", *APCBEE Procedia*, vol.5, pp. 175 – 180, 2013.
- [6] S. Sawant and B. Babaleshwar, "A New Method of Assessment and Equations on Carbon Footprint", *J. Appl. Geology and Geophysics*. vol.3, pp.52-59, 2015.
- [7] J. Townsend, J. Barrett, Exploring the applications of carbon footprinting towards sustainability at a UK university: reporting and decision making, *Journal Of Cleaner Production* , vol. 107, pp.164-176, 2015.
- [8] İ.Faruk Yaka, A.Koçer, A. Güngör, Akdeniz University Health Services Vocational Determination Of Carbon Footprint, *Electronic Journal of Machine Technologies*, vol, 12, no: 3, pp.37-45, 2015.
- [9] World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute, Setting Operational Boundaries, The Greenhouse Gas Protocol, A corporate Accounting and Reporting Standard, 2015.
- [10] IPCC, "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Estimation Methods", General Guidance and Report, 2006.
- [11] World Resources Institute, "Emission Factors from cross sector tools, transport vehicle distance", the GHGs protocol, 2015.
- [12] World Resources Institute, "Emission Factors from cross sector tools, stationary combustion", the GHGs protocol, 2015.
- [13] IPCC, "Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories", Chapter 6:Wastewater Treatment and Discharge, Vol. 5, 2006.
- [14] Global Warming Resources, Tree offset calculation, notes on CO<sub>2</sub> emissions footprint calculator. Available <http://www.carbonify.com/carbon-calculator.htm>.

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 20-04-2017 <u>Kabul/Accepted</u> 19-09-2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.307260	

## Sistemik konstrüksiyon ve tasarım odaklı düşünme yaklaşımı ile yaratıcı kavramsal tasarım süreci: küçük ev aleti tasarımı

Zeynep Parlar<sup>1</sup>, Eray Kaan Soyboru, Mustafa Sefa Burhan, Sena Davaslıgil

### ÖZ

Sunulan çalışmada tasarım odaklı düşünme yaklaşımı ile insanların mutfaktaki hareketleri videolarla incelenmiş, mutfaktaki ihtiyaçlarına yönelik anketler düzenlenmiş ve insanların farkında olmadıkları bir ihtiyaç olarak otomatik gıda karıştırıcısı belirlenmiştir. Sonraki aşamada karıştırma şekli ve amacı üzerine tekrar bir anket çalışması yapılmıştır. Böylece tasarlanacak mamul için müşterinin beklentileri ortaya konulmuştur. Konstrüksiyon sistematigi adımları izlenerek 6 farklı konsept tasarım gerçekleştirilmiş, teknik ve ekonomik değerlendirme sonucunda en uygun alternatif tasarıma karar verilmiştir. Tasarım bu aşamadan sonra detaylandırılmıştır. Detay tasarım gerekli hesapları, deneysel doğrulamayı ve uygun malzeme seçimini kapsamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Tasarım odaklı düşünme, Konstrüksiyon sistematigi, Küçük ev aleti, Karıştırıcı

### Systematic design and design thinking approach for conceptual design process: small household appliance design

### ABSTRACT

In the present study, the design thinking approach was used to observe the movements of people inside their kitchen. Their movements were recorded, and, surveys were organized for their needs in the kitchen. After the evaluation of surveys and examination of recorded videos, it was concluded that one of the items that people do not feel the lack of and that is needed in the kitchen was an automatic food mixer. In the next stage, another survey study was conducted focused on the mixing purpose and type. Thus, the expectations of the customer for the product to be designed have been determined. By following the steps of the systematic design approach, 6 different conceptual designs were obtained. Based on the technical and economic evaluation, the most appropriate design was chosen. After this step, detailed design stage was completed. Detail design stage includes necessary calculations, experimental verification and appropriate material selection.

**Keywords:** Design Thinking, Systematic Design, Small Household Appliance, Food Stirrer

<sup>1</sup> ITU Mechanical Engineering Faculty - parlarze@itu.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde evde yapılan birçok iş tamamen veya kısmi olarak küçük-büyük ev aletleri yardımıyla yapılmaktadır. Bu ev aletleri insan hayatına girdikleri zaman diliminden itibaren emek ve zamandan kazanç sağlanmasının önünü açtıkları için artık günlük hayatın kaçınılmaz yardımcıları konumunda yer almaktadırlar. Özellikle küçük ev aletlerinin günlük yaşamdaki yeri her geçen gün hızlanarak artmaktadır. Sadece 20 yıl öncesine bakıldığında küçük ev aleti denilince akla gelen mamuller mini fırın ve mutfak robotuyla sınırlı kalmaktaydı. Günümüze gelindiğinde ise tost pişirmekten su kaynatmaya, soyup doğrama işleminden kahve pişirmeye kadar pek çok iş, küçük ev aleti kullanılarak gerçekleştirilmekte, klasik yöntemler nerede ise unutulmaya başlanmaktadır. Bunun yanında, otomatik ekmek pişirme makinaları, mikrodalga fırınlar, çay makineleri ve ekmek kızartma makineleri gibi birçok yeni küçük ev aleti de günlük hayata girmiş ve günlük hayatı gözle görülür ölçüde kolaylaştırmıştır. Zaman içerisinde ev aletleri de gelişmekte olup sadece bir fonksiyon için özel tasarımlar, yerini birkaç farklı işlemi yapabilen kompakt tasarımlara bırakmaktadır. Çamaşır makinelerine entegre edilen ve beraber çalışan kurutma makineleri buna güzel bir örnektir.

Küçük ev aletlerinin önümüzdeki yıllarda insan hayatında yapılan birçok farklı alandaki birçok farklı iş için gelişimlerini sürdürmeye ve ihtiyaçlar doğrultusunda yeni mamul olarak ortaya çıkmaya devam edecekleri bir gerçektir. Bu doğrultuda yeni tasarımlar yoluyla bu problemleri çözmek, insan hayatını kolaylaştıran söz konusu mamulleri geliştirmek ve hali hazırda fark edilmemiş ihtiyaçlara cevap verecek mamuller için çalışmalar yapılması gerekliliği kaçınılmazdır.

Bu sebeple insanların yaşam konforunu artırmayı amaçlayan, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayabilecek yeni mamul geliştirme metodolojisi temelinde çalışmalar yapılması gerekmektedir. Bu aşamada, mantıklı ve ihtiyaçları karşılayan bir mamul ortaya koyabilmek için mamul geliştirme metodolojisi aşamaları ve amacını anlamak gerekir. Tasarım, geniş bir bilgi ve beceri gerektiren, geri bildirimlere açık, yeni beğeni ve kullanım ölçütlerinin oluşturulduğu interdisipliner ve multidisipliner bir çaba alanıdır. İcatta olduğu gibi, sorun sınırlama, önerme ve alternatif çözümler üretme süreci olarak, konu hakkında bir düşünce

edinmenin en iyi yoludur. ICSID'e (International Council of Societies of Industrial Design) (2013) göre ise tasarım, "tüm yaşam döngüleri içindeki nesnelere, süreçlerin, hizmetlerin ve sistemlerin çok yönlü niteliklerini kurmayı amaçlayan yaratıcı bir faaliyettir. Endüstriyel tasarım, gerek kullanıcı gerekse imalatçının iki taraflı faydasına olacak şekilde mamullerin ve sistemlerin işlevini, değerini ve görünüşünü en uygun hale getiren kavramları, özellikleri oluşturan ve geliştiren profesyonel bir hizmettir[1-3].

Sunulan çalışmada, müşteri ihtiyacı ve konforunu ön plana çıkararak tasarımın en önemli amacı kabul eden "Tasarım Odaklı Düşünme (Design Thinking)" yöntemi kullanılmıştır. Günümüzde yeni bir mamul geliştirme işlemi genellikle Ar-Ge birimlerindeki mühendislerin fikirleriyle ve müşteriyle geliştirdikleri empati yetenekleriyle belirledikleri ihtiyaçlara göre ortaya çıkmaktadır. Yalnız bu durum belli bir uzmanlık alanındaki bir grubun müşterinin ne istediklerini anlamakta pek efektif bir yol olmamaktadır. Örneğin ev hanımları veya çalışan anneler gibi grupların birbirinden çok farklı ihtiyaçları olabilmektedir. Tasarım Odaklı Düşünme yöntemi tam olarak bu amaçla kullanılmakta ve bu odak grupların farkında oldukları veya olmadıkları ihtiyaçlarına göre çözüm üretmeyi amaçlamaktadır.

## 2. TASARIM ODAKLI DÜŞÜNME METODU (DESIGN THINKING)

Tasarım odaklı düşünme, ilk olarak 1973 yılında Robert McKim'in ortaya attığı bir çalışma yöntemidir. Ancak günümüzde kullanıldığı şekli ile bu metod Stanford Üniversitesindeki Rofl Faste isimli bilim insanının 1980 ve 1990'lar arasında verdiği "*Design Thinking as a Method of Creative Action*" isimli derste şekillenmiştir. Bu yöntem, teoriden iş hayatına ilk defa 1991 yılında IDEO firması tarafından geçirilmiştir [4]. Tasarım odaklı düşünme yaklaşımının strateji ve yenilikçilik başarısını arttırdığının görülmesi üzerine Apple, Coca-Cola, IBM, Nike, Procter&Gamble and Whirlpool gibi firmalar bu yaklaşım ile kullanıcı ihtiyaçları ve arzuları doğrultusunda tasarımlar gerçekleştirmeye başlamışlardır. Tasarım odaklı düşünme yaklaşımı otomotiv sektöründen beyaz eşyaya, küçük ev aletlerinden gıda sektörüne ve elektronik aletlerden ev eşyası tasarımına kadar günümüzde ihtiyaç belirleme ve bu ihtiyaç doğrultusunda çözüm geliştirmek için kullanılmaktadır [5-7]. Diğer yaklaşımlardan en

temel farklılığı, geliştirilecek tasarımda önceliğin müşterinin ihtiyacına verilmesi oluşturmaktadır. Bu yaklaşımla, kullanıcının farkında olmadığı ihtiyacı ortaya koyma ve bu ihtiyaca çözüm bulma amacı güdülmektedir. Bu nedenle tasarım kısıtlarını, müşterinin ihtiyaçları belirlemektedir.

Tasarım odaklı düşünme yaklaşımı beş ana aşamadan oluşmaktadır. Bunlar Şekil 1’de görüldüğü üzere Tanımlama (Empathise), Araştırma (Define), Mamul Fikri Oluşturma (Ideate), Prototip oluşturma (Prototype) ve Deneme (Test) olarak sıralanabilir.



Şekil 1. Tasarım Odaklı Düşünme Metodolojisinin Ana Adımları (Steps of Design Thinking)

**Tanımlama** aşamasında kullanıcı ihtiyacının belirlenmesi ve problemlerin tanımlanması amacı güdülmektedir. Bu amaçla, kullanıcılar ile sözlü ve yazılı olarak iletişime geçilip kullanıcı gözlemlenerek nelere ihtiyaç duyduğu belirlenmeye çalışılır. Bu işlemin sonucunda kullanıcının farkında olduğu veya olmadığı ihtiyaçlar sıralanır. **Araştırma** aşamasında ise kullanıcılardan edinilen bilgiler gruplandırılarak incelenir ve ihtiyaç belirlenir. Bir sonraki adımda belirlenen bu ihtiyaçlara yönelik çözümler önerilerek **mamul fikri** oluşturulmaktadır [8]. Son iki aşamada ise bu fikre yönelik basit **prototipler** hazırlanmaktadır. Hazırlanan bu basit prototipler yardımı ile kullanıcının bu yeni mamulü **denemesi** istenir. Böylece elde edilen kullanıcı yorum ve görüşlerine göre mamul fikri geliştirilmektedir.

Sunulan çalışmada mutfakta kullanılmak üzere geliştirilmek istenen yeni bir küçük ev aleti tasarımı için mamul fikri geliştirme aşamasında bu yöntem uygulanmıştır. Ortaya çıkan mamul fikri için tasarım detaylandırılmıştır.

### 3. MAMUL FİKRİ GELİŞTİRME (PRODUCT PLANNING, DEVELOPMENT AND EVALUATION)

Sunulan çalışmada ihtiyaçların belirlenebilmesi amacı ile alan ve hedef kitle öncelikli olarak belirlenmiştir. Çalışan hanımlar ve bekâr erkeklerin mutfakta geçirmek için ayırdıkları

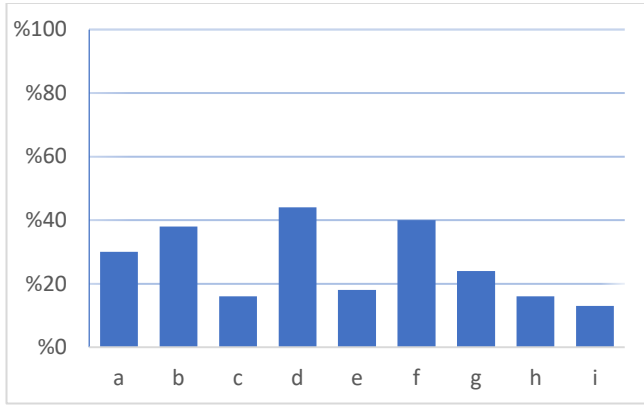
zamanın modern kent yaşantısında oldukça kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu zamanın daha verimli olarak kullanılabilmesi yapılan çalışma ile hedeflenmiştir. Bu amaçla, kullanıcının mutfak sınırları içerisindeki problem ve ihtiyacı belirlenmeye çalışılmıştır. Tanımlama aşamasında 53 mutfak kullanıcısıyla iletişime geçilerek gerek yazılı gerekse sözlü olarak problem ve ihtiyaçları sorulmuştur. Aynı zamanda ihtiyacının farkında olamayan kullanıcılardan 7 kişinin mutfakta geçirdikleri zaman videoya alınarak ve daha sonra o videolar incelenerek hangi işlemleri gereksiz yere tekrar ettikleri ve hangi işlemlerin olması gerektiğinden daha uzun zaman aldığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışma sonucunda kullanıcıların ihtiyaç ve problemleri listelenmiş ve 68 problemin yaşandığı belirlenmiştir.

Araştırma aşamasına geçildiğinde gruplandırma yapabilmek amacıyla belirlenen problemlerin birbirleri ile olan ilişkileri tartışılmış ve 6 ana problemin varlığı tespit edilmiştir. Bunlar “mutfak aletlerinin temizliği”, “atık yönetimi”, “tezgâh temizliği ve organizasyonu (akıllı mutfak tasarımı)”, “sebze yıkama-doğrama-kurutma”, “bulaşık makinesi ve buzdolabı kullanım ergonomisi” ile “karıştırma işlemi” dir. Bu ana 6 problem incelendiğinde her birinin ayrı bir inceleme konusu olduğu görülmektedir. Belirlenen her bir problem için bir çalışma grubu oluşturularak ele alınması ve her biri için çözümler geliştirilmesi mümkündür. Bunun yanında firmanın öncelikleri, pazardaki genel eğilimler göz önüne alınarak bir veya birkaç probleme çözüm arama şeklinde çalışmaya devam edilebilir. Sunulun çalışma kapsamında pişirme sırasında karıştırma işleminin bir küçük ev aleti yardımı ile gerçekleştirilmesi ve kullanıcının ocak başında harcadığı zamanın azaltılması hedeflenmiştir. Yemek pişirme esnasında uygulanan karıştırma işlemini anlamak, kullanıcının beklentilerini belirlemek amacıyla 450 kişinin katıldığı bir anket çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu ankette kullanıcılara 4 soru yöneltilmiş ve verdikleri cevaplar değerlendirilmiştir. Bu anket soruları ve kullanıcıların verdikleri cevaplar şu şekildedir:

#### 1. Hangi yemekleri pişirirken karıştırma işlemi uyguluyorsunuz?

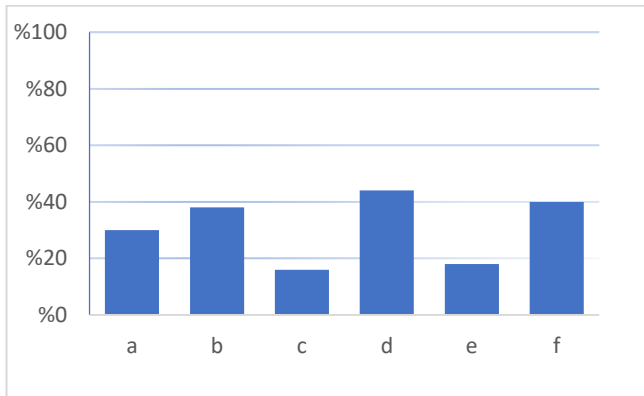
- Çorba,
- Puding ve muhallebi,
- Makarna ve pilav,
- Sulu yemekler,
- Et ve tavuk yemekleri
- Keşkek

- g. Helva
- h. Hamur işleri,
- i. Soğan ve biber



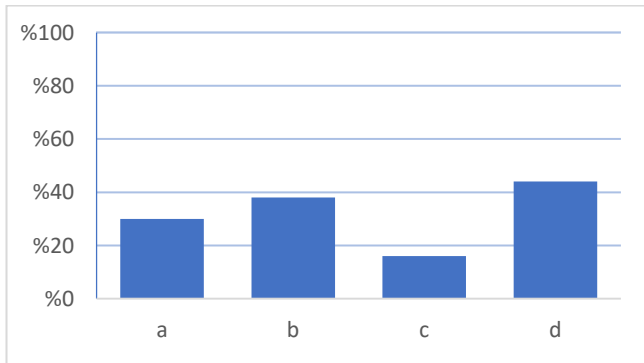
## 2. Karıştırma işlemini ne amaçla yapıyorsunuz?

- a. Dibi tutmaması için,
- b. Homojen ısınması için,
- c. Çözme amaçlı,
- d. Katı parçaları ezmek,
- e. Çırpma amaçlı,
- f. Malzemelerin homojen dağılması



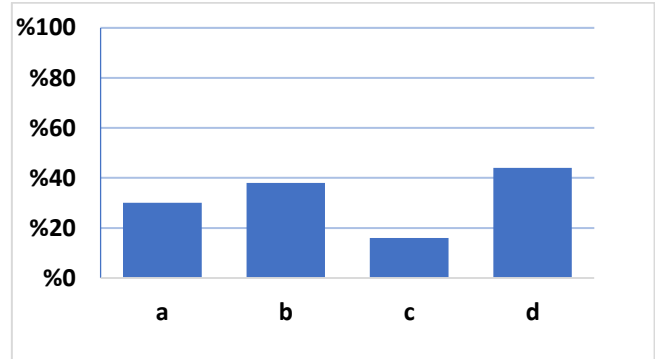
## 3. Karıştırma işlemine ne kadar süre harcıyorsunuz?

- a. 1-5 dakika,
- b. 5-10 dakika,
- c. 10-15 dakika,
- d. 15 dakika ve üzeri



## 4. Karıştırma işlemini nasıl yapıyorsunuz?

- a. Sürekli olarak tek yöne hareketlerle,
- b. Yemeği ters-düz ederek,
- c. Ara sıra kontrol amaçlı,
- d. Karışık hareketlerle



Yapılan anket sonucu incelendiğinde karıştırma işleminin daha çok muhallebi ve çorba gibi gıdaları pişirmek için uygulandığı, pişirilen gıdanın dibinin tutmamasının istendiği, karıştırma yönünün düzensiz olduğu ve karıştırma işleminin ise maksimum 15 dakika sürede tamamlanmasının beklendiği sonucu ortaya çıkmıştır. Bu durumda odaklanılması gereken yemeklerden çorba ve pudingin sabit hızda ve aynı yönde, taban yüzeyi sıyrılarak bir karıştırma işlemi istendiği, helva yapımında ise alt üst edebilen ve sürekli bir karıştırma işlemi ihtiyacı belirlenmiştir. Ayrıca karıştırma işleminde maksimum düzensizlik amaçlandığı yani düzgün bir karıştırmadan çok gıdanın mümkün olduğunca düzensiz bir hale getirilmesinin amaçlandığı belirlenmiştir. Bunun yanında, ocak üzerinde kablolu bir yapının bulunmasının güvenli olmayacağı da ankete katılan kişiler tarafından dile getirilmiştir.

## 4. KARIŞTIRICI TASARIMI (DESIGN OF STIRRER)

Tasarım süreci mamul fikrinin ortaya çıkması ile başlar. Bu aşamadan sonra tasarlanacak mamulden beklenen özelliklerin belirlenmesi yani kısıtların açıkça ortaya koyulması ile ödev açıkça tanımlanır. Ödevin temel fonksiyonu ele alınarak alternatif çözüm önerileri sunulur. Bu çözümler arasında teknik ve ekonomik bir değerlendirme yapılarak en uygun çözüme karar verilir. Seçilen çözüm için gerekli mühendislik hesapları, doğrulama çalışmaları yapılarak tasarım detaylandırılır. Sunulan çalışmada konstrüksiyon sistematğinde izlenen bu süreç, adım adım karıştırıcı tasarımı sırasında uygulanmaya çalışılmıştır.

#### 4.1. Ödevin Tanımlanması (Task Clarification)

Mamul fikri geliştirme çalışması sonucunda ödev, tencerede yemek pişirme sırasında karıştırma işlemini otomatik olarak gerçekleştirecek bir küçük ev aleti tasarımı olarak tarif edilmiştir. Bu küçük ev aletinin tasarımı sırasında ergonomik değerlendirme, kullanıcının istekleri, tencere boyutları, insan sağlığı gibi hususlar göz önüne alınmalıdır. Buna göre, şekillendirme sırasında göz önüne alınan kısıtlar şu şekilde sıralanabilir:

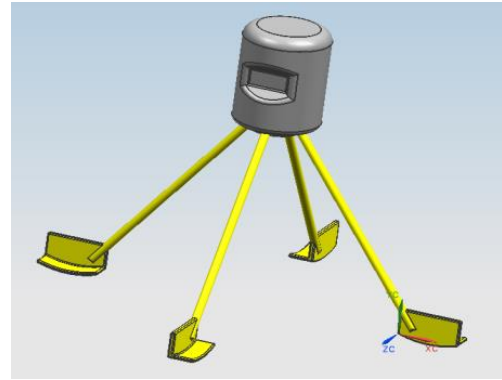
- Paslanmaz çelikten imal edilmiş tencerede kullanılabilirliği,
- Evlerde kullanılan tencere boyutları göz önüne alındığında 260 mm çapa kadar her tencereye monte edilebilirliği,
- 300 mm derinliğe kadar olan tencerelerde kullanılabilirliği,
- Herkes tarafından kolaylıkla montaj ve demontajı gerçekleştirilebilirliği,
- Maksimum 150° C sıcaklığa kadar çalışabilirliği,
- İnsan sağlığı açısından 0 ila 150° C arasında kullanılan malzemelerde herhangi bir kimyasal reaksiyon görülmemeli,
- Karıştırma işlemi, pişirilen gıdada herhangi bir bozulmaya neden olmamalı,
- Çalışma sırasında gürültü seviyesi 60 dB aşmamalı,
- Karıştırma işlemi sırasında titreşim nedeni ile güvenlik riski oluşturmamalı,
- Karıştırıcının maksimum ağırlığı 2 kg olmalı,
- Karıştırıcı bir DC motor ile tahrik edilmeli,
- Kablosuz kullanım için karıştırıcının en az 30 dakika çalışabileceği bir batarya düşünülmesi,
- Homojen bir karıştırma sağlayabilirliği,
- Çorba ya da puding gibi farklı kıvamdaki gıdalarda rahatlıkla kullanılabilirliği,
- Kolay saklanabilirliği,
- Kolay temizlenebilirliği,
- Birim maliyeti 20 \$'ı geçmemelidir.

#### 4.2. Çözüm Önerileri (Conceptual Design)

Tanımlanan ödevde temel fonksiyon homojen bir karıştırmanın sağlanmasıdır. Bu fonksiyonu yerine getirebilecek çözüm önerilerinde iki sorunun cevabı aranmaya çalışılmıştır. Karıştırma için hangi hareket sağlanmalıdır ve karıştırıcı tencereye sabitlenmeli midir? Ayrıca, motordan alınacak dönme hareketi ile karıştırma işleminin nasıl sağlanacağı irdelenmiştir. Bu amaçla benzer

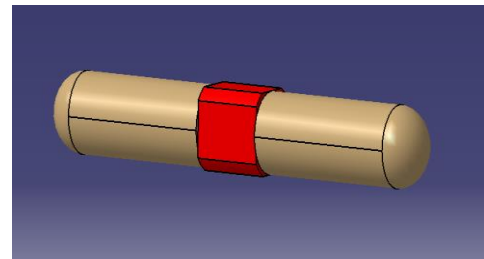
sistemler incelenmiş ve istekler listesinde yer alan kısıtların nasıl uygulanabileceği tartışılmıştır. Buna göre oluşturulan dört çözüm önerisi şu şekildedir:

**Alternatif 1:** Şekil 2'de görüldüğü gibi dört esnek ayak üzerinde bir kurulumla gerek duyulmadan sadece tencere içerisine bırakılmaktadır. Bir motor ile tahrik edilen esnek ayaklara bağlı karıştırıcı kolların sağa sola hareket ettirilmesi düşünülmüştür. Bu sayede tencere dibinde yüksek bir düzensizlik yaratılması ve dipten sıyırma işlemiyle karıştırma yapılması amaçlanmıştır. Düşeydeki hareketin yanında aparatın kendi ekseninde etrafında da dönerek alışılmış karıştırma işlemini de yerine getirmesi hedeflenmiştir.



Şekil 2. Alternatif 1

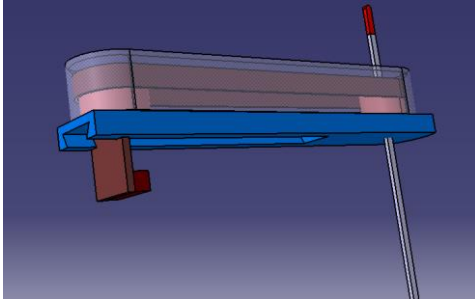
**Alternatif 2:** İki adet silindirik şekilde karıştırıcı, ortada bulunan motora bağlıdır (Şekil 3). Teleskopik olarak düşünülen karıştırıcılar ile farklı tencere boyutlarına uyum sağlanması düşünülmektedir. Silindirik karıştırıcılar aynı ekseninde ve farklı yönlerde dönmektedir. Böylece cihaz da kendi ekseninde etrafında dönebilmektedir.



Şekil 3. Alternatif 2

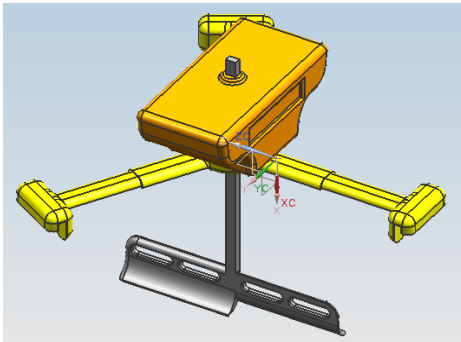
**Alternatif 3:** Şekil 4'de görülen bu tasarımda tencerenin orta noktasından tek bir karıştırıcı kullanılması düşünülmüştür. Bu durumda motordan dönme hareketinin titreşime neden olmadan alınabilmesi amacı ile tencereye bir noktadan sabitlenmesi düşünülmüştür. Motor sabitleme noktasında yer aldığı bir kayış kasnak mekanizması yardımı ile dönme hareketi tencerenin ortasında bulunan karıştırıcıya aktarılmıştır. Sistem ayrı parçalar halinde

tasarlanmış ve bu şekilde temizlik ve saklama kolaylıkları sağlanması düşünülmüştür.



Şekil 4. Alternatif 3

**Alternatif 4:** Bu çözümde ise karıştırıcı tencereye üç kol yardımıyla bağlanmaktadır (Şekil 5). Bu kollar teleskopik olarak düşünülmüş ve bu sayede çap ayarı yapılmasına olanak tanınmıştır. Ayrıca derinlik ayarı ise düşeyde serbest bırakılan mil yardımıyla yapılabilmektedir. Aparat tutucu kısmının üzerinde yer alan motor, dişli kutusu ve batarya kısımlarını içerisinde barındıran gövdeden aldığı hareketi mile aktarmakta mil ise tencerenin dibinde kendisine bağlanmış olan karıştırıcı kollara bu hareketi iletmektedir.



Şekil 5. Alternatif 4

### 4.3 Teknik ve Ekonomik Değerlendirme (Technical and Economical Evaluation)

Makina konstrüksiyonu açısından en mükemmel çözüm değil tasarım kısıtlarını en iyi yerine getirebilen en uygun çözüm aranmaktadır. O nedenle hem teknik hem de ekonomik açıdan alternatif çözümlerin objektif olarak değerlendirilmesine ihtiyaç vardır. Bu amaçla ağırlıklı hedefler sistemi kullanılmıştır.

#### 4.3.1. Ağırlıklı Hedefler Sistemi (Weighting Evaluation Criteria System)

Ağırlıklı hedefler sistemi ile yapılan değerlendirmede, hedef kriterler göz önüne alındığında çözümünün ne kadar güçlü ya da kullanışlı olduğu belirlenmektedir. Bir başka deyişle, alternatif çözüm önerilerinin ideal ya da referans olarak kabul edilen çözümü, mevcut

teknolojik ve ekonomik koşullar göz önüne alındığında ne oranda sağladığının bir değerlendirmesi yapılmaktadır. Bu amaçla, hedef kriterin ana fonksiyonu gerçekleştirmeye olan etkisi 0 ile 1 arasında tanımlanan bir ağırlık faktörü ile göz önüne alınmaktadır [9]. Sunulan çalışma kapsamında tasarımı gerçekleştirecek küçük ev aleti için dört *Temel Hedef* (TH) ile bunların içerdiği *Alt Hedefleri* (AH) şu şekilde sıralamak mümkündür.

#### Karıştırma performansı

- Homojen karıştırma kabiliyeti
- Tencere dibi sıyırma performansı

#### Fonksiyon Güvenilirliği

- Titreşim ve ses seviyesi
- Sistem basitliği
- Saklama kolaylığı
- Temizleme kolaylığı

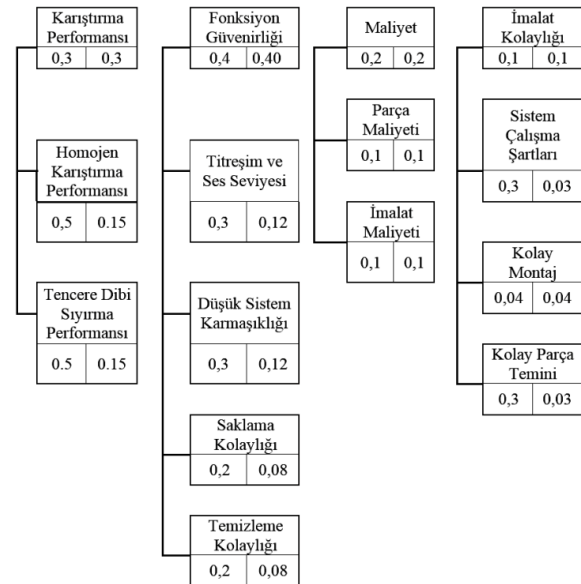
#### Maliyet

- Parça maliyeti
- İmalat maliyeti

#### İmalat kolaylığı

- Kolay parça temini
- Kolay montaj
- Tencereye uygunluk

Şekil 6'da her bir hedef kriterin temel fonksiyonu yerine getirmekteki önem sırasına göre verilen ağırlık puanları görülmektedir.



Şekil 6. Ağırlıklı Hedefler Sistemi (Weighting Evaluation Criteria System)

Ağırlıklı hedef puanları belirlenirken öncelikle temel hedeflerin kendi içinde toplamları 1 olacak şekilde temel fonksiyonu gerçekleştirmeye olan etkisi dikkate alınmıştır. Alt hedefler içinde benzer şekilde ilgili temel hedefe katkısı puanlanıp kutucuklardaki ilk sayı olarak yerleştirilmiştir. Her



alt hedefin sistem içindeki *Toplam Ağırılıkları* (TA) ise bu iki değer çarpılarak ( $TA=TH \times AH$ ) bulunmuş ve ağırlıklı hedef puanı olarak kutucuklardaki ikinci sayı belirlenmiştir.

#### 4.3.2. Hedef Büyüklükleri Matrisi (Evaluation Chart)

Bu bölümde daha önce belirlenen alternatif tasarımlar, oluşturulan ağırlıklı hedefler sistemindeki alt hedefler doğrultusunda karşılaştırılmıştır. Alternatif tasarımlara, her bir alt hedefe göre 10 üzerinden puanlar verilmiştir. Eğer incelenen çözümde özellik, referans özelliğe eşit ise buna tam puan, referans özelliğe hiç yaklaşmamışsa sıfır olarak değerlendirilmiştir. Bu puanlar, ağırlıklı hedefler sistemindeki alt hedeflerin ağırlıkları ile çarpılarak, o hedefe ilişkin aldığı puan hesaplanmıştır. Daha sonra her bir alternatif tasarım için bu puanlar toplanmış, o alternatifin 10 üzerinden aldığı toplam puan bulunmuştur. Tablo 1'de çözüm önerileri bölümünde sunulan alternatif tasarımların hedef büyüklükler matrisi görülmektedir.

Tablo 1. Hedef Büyüklükleri Matrisi (Evaluation Chart)

Hedef Büyüklükleri		g	Alternatif 1		Alternatif 2		Alternatif 3		Alternatif 4	
			Pi	g*Pi	Pi	g*Pi	Pi	g*Pi	Pi	g*Pi
Karıştırma Performansı	Homojen Karıştırma Performansı	0,15	6	0,9	4	0,135	6	0,9	9	1,35
	Tencere Dibi Sıyırma Performansı	0,15	6	0,9	3	0,135	3	0,45	9	1,35
Fonksiyon Givemliliği	Titreşim ve Ses Seviyesi	0,12	6	0,72	6	0,72	8	0,96	8	0,96
	Düşük Sistem Karmaşıklık	0,12	6	0,72	5	0,6	3	0,36	8	0,96
	Saklama Kolaylığı	0,08	3	0,24	8	0,64	5	0,4	8	0,64
	Temizleme Kolaylığı	0,08	3	0,24	4	0,32	8	0,64	9	0,72
Maliyet	Parça Maliyeti	0,1	5	0,5	4	0,4	3	0,3	7	0,7
	İmalat Maliyeti	0,1	5	0,5	3	0,3	3	0,3	9	0,9
İmalat Kolaylığı	Sistem Çalışma Şartları	0,03	6	0,18	8	0,24	4	0,12	8	0,24
	Kolay Montaj	0,04	4	0,16	7	0,28	4	0,16	9	0,36
	Kolay Parça Temini	0,03	4	0,12	3	0,09	4	0,12	8	0,24
Toplam			5,18		3,86		4,71		8,42	

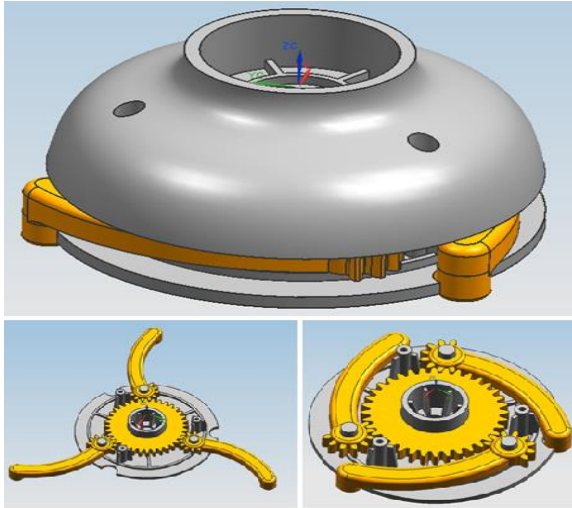
Yukarıda belirtildiği gibi her bir alternatif önerinin aldığı puanlar referans yani ideal duruma olan yakınlıklarını göstermektedir. Buradaki amaç sadece temel fonksiyonu yerine getiren bir çözüm önerisi sunmaktan ziyade teknik olarak en uygun çözüme ulaşmaktır. Buna göre, Alternatif 4 istenen hedefleri karşılayan en uygun çözüm olarak karşımız çıkmaktadır.

## 5. TASARIMIN DETAYLANDIRILMASI (EMBODIMENT DESIGN)

Teknik ve ekonomik değerlendirme sonucu öne çıkan alternatif tasarım, istekler listesinde belirtilen kısıtları sağlayacak şekilde tekrar ele alınmıştır. Prensip olarak ele alınmış çözümün detaylandırılması aşamasında tencereye montaj, karıştırıcı formu, temizlik ve saklama koşulları ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu süreçte birçok sorunla karşılaşmış ve bu sorunlar çözülürken karıştırma prensibi aynı kalarak parçalar yeniden şekillendirilmiştir. Ayrıca istekler listesindeki bütün maddelere cevap verebilmek için birçok yeni özellik de eklenmiştir.

### 5.1 Tutucu Mekanizma Tasarımı (Arm-Mechanism Design)

Yapılan tutucu mekanizma tasarımlarında, tutucu kısmın tencere ile rijit bir bağ kurması, kol sayısı, montaj sonrası eksen çakışması gibi kriterler göz önünde bulundurulmuştur. Buna göre Şekil 7'de görüldüğü gibi tutucu kollar ortada yer alan bir dişli mekanizması ile tahrik edilmektedir. Bu mekanizma sayesinde üç kolda aynı açı ile tencereye monte edilebilmekte, tencere eksenini mekanizma eksenine çakışması sağlanabilmektedir. Ayrıca tutucu kolların kapalı konumda iken kaplayacağı hacim daha küçük olacağından mutfak saklama koşullarında da kullanıcı odaklı bir tasarım oluşturmaktadır. Tutucu mekanizmanın bakım istememesi ve hafif olması nedeni ile polimer esaslı malzemeden yapılması öngörülmüştür. Ayrıca polimer esaslı bir malzeme kullanmak hem seri imalata uygun imalat yöntemleri hem de karmaşık geometrileri elde edebilme kolaylığı sağlamaktadır. Daha uzun ömür açısından cam elyaf takviyeli poliamid kullanmanın uygun olacağı düşünülmüştür [10-11].



Şekil 7. Tutucu Tasarımı (Arm Design)



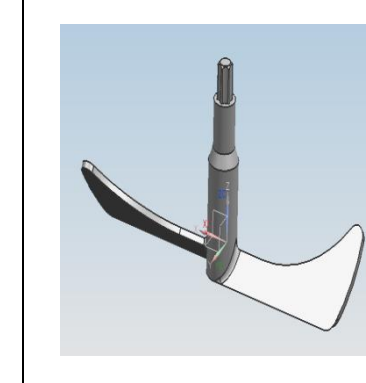


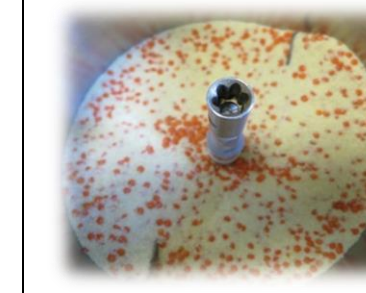
Malzeme seçimi esnasında dikkat edilen bir diğ er seçim kriteri de malzeme gıda etkileşimi olmamasıdır. Seçilen malzemenin ‘Türk Gıda Kodeksi’nin açıklamış olduğu standartları sağlaması gerekmektedir. Bu çerçevede seçilecek

malzemenin karıştırma işlemi süresince karşılaşacağı yüksek sıcaklıklarda gıda ile herhangi bir etkileşime girmemesi gerekmektedir. Ayrıca bu sıcaklıklarda formunu koruyabilmesi ve kalıcı bir deformasyona uğramaması gerekmektedir. Bu kapsamda malzeme olarak belirlenen cam elyaf takviyeli poliamid bu kıstasları karşılamaktadır [12].

## 5.2 Karıştırıcı Formu Tasarımı ve Moment Hesabı (Embodiment of Stirrer and Torque Calculation)

Karıştırma işlemi, tasarlanan küçük ev aleti için ana fonksiyonu oluşturmaktadır ve kullanıcı isteklerini karşılayacak performansta olması mamulün pazar payı açısından oldukça önemlidir. Homojen bir karıştırma elde edebilmek için Tablo 2’de görülen 3 farklı karıştırıcı formu düşünülmüştür.

Tablo 2. Karıştırıcı Formları ve Performans Testleri (Stirrer Forms and Tests)

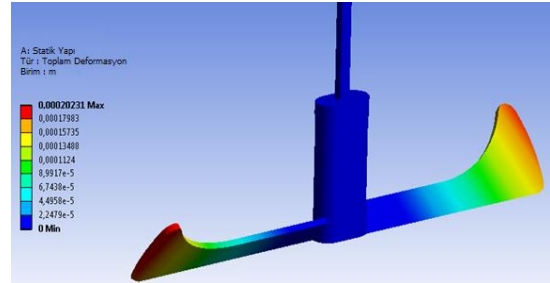
Form A				Form B				Form C			
											
											
n [d/dak]	U [V]	I [A]	P [W]	n [d/dak]	U [V]	I [A]	P [W]	n [d/dak]	U [V]	I [A]	P [W]
20	0	0,00	-	20	9	0,09	0,81	20	9	0,08	0,72
30	13	0,10	1,30	30	12	0,1	1,20	30	11	0,08	0,88
40	15	0,11	1,65	40	15	0,1	1,50	40	13	0,08	1,04
50	19	0,13	2,47	50	18	0,1	1,80	50	16	0,08	1,28
60	20	0,12	2,40	60	20	0,1	2,00	60	19	0,09	1,71
70	24	0,13	3,12	70	22,5	0,1	2,25	70	21	0,09	1,89
80	27	0,15	4,05	80	24,5	0,1	2,45	80	23	0,09	2,07
90	30	0,16	4,80	90	27	0,1	2,7	90	26	0,10	2,47
100	33	0,18	5,94	100	29	0,1	2,90	100	29	0,10	2,76

Piştirme sırasında karıştırılacak gıdaların çeşitlilik göstermesi nedeni ile deneysel olarak performans özellikleri incelenmiştir. Deneysel olarak irmik ve kırmızı mercimek kullanılmıştır. Böylece renk farklılığı sayesinde karışımın homojenliği gözlemlenmiştir. Karıştırma işleminin homojen olmasının yanında tencere dibinin tutmaması da karıştırma işlemi sırasında sağlanmalıdır. Ayrıca karıştırma işlemi sırasında çekilen güç değeri de ölçülerek enerji tüketimi açısından da değerlendirme yapılmıştır. Form A da asimetrik bir yapı söz konusudur. İrmigi uzun kolun uç kısmında yığıldığı ve gıdayı karıştırmak yerine sürüklediği gözlemlenmiştir. Karıştırma işlemi sırasında kollar saat yönünün tersine dönmektedir. Form B ile yapılan deneylerde tencere kenarlarında bir birikme olmadığı karışımın merkeze doğru yönlendiği gözlemlenmiştir. Ancak karıştırma sırasında tencere dibinin tutması riski olabileceği düşünülmektedir. Form C ile oldukça homojen bir karıştırma elde edilmiştir. Ayrıca dip sıyırma açısından da istenilen beklentiyi karşılayacağı düşünülmektedir. Deneyler 20-100 d/dak aralığında farklı devir sayılarında tekrarlanmıştır. Gücün hesaplanabilmesi ( $P=U \cdot I$ ) için ölçülen volt (U) ve amper (I) değerleri kullanılmıştır. Form C kullanılması durumunda daha az enerji tüketimi ile istenilen karıştırma performansının sağlanması mümkün olacaktır.

Karıştırıcı formu yanında kullanılacak malzemeden de gıda ile kimyasal reaksiyona girmemesi ve 150°C sıcaklığa kadar güvenle kullanılabilmesi beklenmektedir. Yapılan malzeme araştırması sonucunda AISI 304 paslanmaz çeliğin gıdaya uygunluğu, imalat kolaylığı ve kolay temin edilebilmesi nedeni ile kullanılmasının uygun olacağına karar verilmiştir. Ancak tencereye zarar vermemesi için yüzeyinin veya tabanının cam elyaf takviyeli plastiklerden polifenilen sülfid ile kaplanması uygun olacaktır [13].

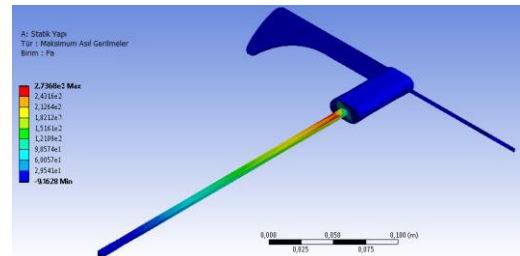
Karıştırıcının boyutlandırılması ve tahrik için uygun elektrik motorunun seçimi için deneysel olarak elde edilen güç değerleri kullanılabilir. Güç ve devir sayısı biliniyorsa iletilecek moment  $M=9550 \cdot P[\text{kW}]/n[\text{d/dak}]$  bağıntısı yardımı ile Nm cinsinden hesaplanabilir. Buna göre Form C için ortalama moment değeri 0,26 Nm olarak hesaplanmıştır. Tencere çapına göre belirlenen karıştırıcı kol uzunluğu dikkate alındığında karıştırıcının, uç noktasından 3 N'luk bir kuvvet etkisinde zorlandığı hesaplanmıştır. Karıştırıcı boyutlarının kontrol hesabı ANSYS programı

kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analizlerde 2 kat emniyetle etki eden kuvvet değeri 6 N olarak alınmıştır. Şekil 8'de gerçekleştirilen sayısal analiz sonucunda karıştırıcı kolundaki deformasyonun değişimi görülmektedir. Karıştırıcı kol üzerinde en büyük deformasyonun beklendiği gibi kolun uç kısmında ve 0,2 mm değerinde olduğu görülmüştür.



Şekil 8. Karıştırıcı Kolunda Meydana Gelen Deformasyonun Değişimi (Deformation of Stirrer Form)

Şekil 9'da karıştırıcı kolundaki gerilme dağılımı görülmektedir. Analiz sonucu incelendiğinde maksimum gerilmenin beklendiği gibi orta noktada meydana geldiği ve paslanmaz çelikten imal edilecek olan bu parça için oldukça düşük bir değerde olduğu görülmektedir. Bu sebeple, tasarlanan karıştırıcı kolda mukavemet açısından herhangi bir risk ortaya çıkması beklenmemektedir.



Şekil 9. Karıştırıcı Kolunda Meydana Gelen Gerilmeler (Stress of Stirrer Form)

Karıştırıcı kolu tahrik edecek motor seçiminde deneysel sonuçlar doğrultusunda elde edilen güç ve devir sayıları dikkate alınmıştır. Buna göre, ticari olarak elde edilebilen MT18 kodlu 55 d/dak hız da 0,42 Nm döndürme momenti veren 12 Volt redüktörlü DC motor seçilmesinin uygun olduğu görülmüştür [14-15].

## 6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ (CONCLUSION)

Çalışma kapsamında tasarım odaklı düşünme yaklaşımına göre belirlenen odak grubun ihtiyaçlarını tespit etmek amacıyla anketler yapılmış, videolar çekilmiş ve yüz yüze görüşmeler yapılmıştır. Bu sayede problem belirlenirken müşteriler ile empati kurulabilmiş ve

müşterilerin istekleri veya farkında olmadıkları ihtiyaçları belirlenmiştir. Yeni mamul fikri olarak otomatik gıda karıştırıcısı belirlendikten sonra sistematiik konstrüksiyon yaklaşımı ile karıştırıcı tasarımı detaylandırılmıştır. Bu yaklaşımla;



- Müşteri isteklerini daha iyi anlayabilme
- Müşterinin ihtiyacına yönelik daha yaratıcı çözümler ortaya koyabilme,
- Konstrüktif kısıtların daha doğru belirlenebilmesi
- Daha sistemli bir tasarım yapabilme
- Tasarımların her yönüyle ele alınabilmesi

gibi birçok alanda katkı sağlamıştır. Belirlenen mamul fikri için ilk olarak alternatif tasarım önerileri üzerinde düşünölmüş, kısıt ve istekler listesi oluşturulmuştur. Fayda-değer analizi yardımı ile yapılan konsept tasarımlar birbirleriyle birçok alanda karşılaştırılmış; istenilen istek ve kısıtları en iyi sağlayabilen konsept tasarım seçilmiştir. Seçilen tasarımın prototip olarak üretilmesi için mukavemet hesapları, moment hesabı, malzeme seçimi, motor ve batarya seçimi, imalat yöntemi seçimi, montaja ve seri imalata uygunluk başlıkları altında tasarım detaylandırılmıştır. Son olarak mamul haline getirilen tasarımın prototipi gerçekleştirilerek kullanıcıya sunulmuştur. Bu sayede seri imalata geçilmeden kullanıcının beğenmediği veya eksik gördüğü yönler tekrar gözden geçirilmiştir.

Tasarımı sonrasında seri imalatı yapılması planlanan mamulün odak grubun mutfakta harcadıkları zamanı daha verimli geçirmelerine ve gereksiz harcadıkları zamanı başka işlerle değerlendirmelerine imkân tanıyacağı öngörülmektedir. Bu durumda kullanıcı emekten, zamandan ve enerjiden ciddi anlamda tasarruf etmiş olacaktır.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] M. Erkin, "OMÜ Güzel Sanatlar Enstitüsü Bildirgesi (Geleceğe Bakış)," 2009.
- [2] S. Choi, "Designnovation Studio – Open and Adaptable Design Education for Design Innovation," ICSID Design Education Conference, Singapore, 2009. [Online].  
Yararlanılabilir:  
<http://www.icsid.org/education/education/articles1061.htm>, [Alındığı Tarih: 16-Mart-2016].
- [3] P.T. Skaggs, "The New Studio: Breaking a Long Tradition," *IDSA 2013 Education Symposium*, Chicago, ABD, 2013.
- [4] A.R. Faste, B. Roth, and B. J. Wilde, "Integrating Creativity into the Mechanical Engineering Curriculum," *Resource Guide to Innovation in Engineering Design*, American Society of Mechanical Engineers, New York, 1993.
- [5] T. Brown, "Design Thinking," *Harvard Business Review*, 2008.
- [6] K. Dorst, N. Cross, "Creativity in the design process: Co-evolution of problem-solution," *Design Studies*, pp. 425–437, 2001.
- [7] G. Pah, W. Beitz, J. Feldhusen, and K. H. Grote, "Engineering Design," *Springer science*, pp. 63-145, 2007.
- [8] H. Plattner, C. Meinel, and L. J. Leifer, "Design thinking: understand, improve, apply. Understanding innovation," *Heidelberg: Springer-Verlag*, pp. 14–16, 2011.
- [9] S. Pugh, "Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering," *Gives a good overview of the design process and many examples of the use of decision matrices*, 1991.
- [10] C. Carraher, "Polymer Chemistry," *CRC Press*, 2007.
- [11] M. F. Ashby, "Material Selection in Mechanical Design", *Butterworth-Heinemann*, 1992.
- [12] Resmi Gazete, "Turk Gıda Kodeksi Gıda İle Temas Eden ve Malzemeler Yönetmeliği," 2011. [Online].  
Yararlanılabilir:  
<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2011/12/20111229M3-9.htm>, [Alındığı Tarih: 28-Mart-2016]
- [13] W. D. Callister, "Materials Science and Engineering," *John Wiley & Sons*, 2000.
- [14] M. Imeryuz, "Elektronik Mühendisliği Temelleri," *BirsenYayınevi, İstanbul*, 2009.
- [15] Robotistan, "12v DC Motorlar," 2015. [Online].  
Yararlanılabilir:  
<http://www.robotistan.com/12v-55-rpm-1-reduktorlu-dc-motor> [Alındığı Tarih: 25-Nisan-2016]

	<b>SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ</b> <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	<b>e-ISSN: 2147-835X</b> <b>Dergi sayfası: <a href="http://dergipark.gov.tr/saufenbilder">http://dergipark.gov.tr/saufenbilder</a></b>		
	<u>Geliş/Received</u> 08.06.2015 <u>Kabul/Accepted</u> 25.01.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.221226	

## Oxley modelleme yaklaşımının tahmin doğruluğu ve verimliliğinin artırılması

Mehmet Aydın\*<sup>1</sup>

### ÖZ

Bu çalışmada, kesme kuvvetlerini ve talaş kalınlıklarını daha yüksek doğruluk ve verimlilikle tahmin etmek için genişletilmiş Oxley modelleme yaklaşımının iyileştirilmesi ele alınmıştır. İş parçası malzemesi özellikleri Johnson–Cook akış gerilmesi denklemi kullanılarak modellenmiştir. Oxley modelleme yaklaşımının hesaplama verimliliğini artırmak için model parametrelerinin ( $\phi$ ,  $C_0$ ,  $\delta$ ) başlangıç değerlerinin eniyilemesi yapılmıştır. Tahmin doğruluğunu yükseltmek için Oxley modelleme yaklaşımına bir sıcaklık hesaplama yöntemi dahil edilmiştir. Tahmin edilen sonuçlar AISI 1045 çeliği iş parçası üzerinde karbür kesici takımlarla gerçekleştirilen dik kesme testlerinden elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, genişletilmiş Oxley modelleme yaklaşımının geliştirilen versiyonunun tahminlerinin genişletilmiş orijinal versiyonun sonuçlarına göre deneysel verilerle daha iyi bir uyum içinde olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** kayma düzlemi, malzeme modeli, Oxley'in modeli, takım–talaş arayüzü, talaşlı imalat

## Increasing prediction accuracy and efficiency of Oxley modeling approach

### ABSTRACT

In this paper, the improvement of the extended Oxley modeling approach is considered to predict the cutting forces and chip thicknesses with higher accuracy and efficiency. The workpiece material properties are modeled using the Johnson–Cook flow stress equation. The initial values of the model parameters ( $\phi$ ,  $C_0$ ,  $\delta$ ) are optimized to increase the computation efficiency of the Oxley modeling approach. A temperature calculation method is included into the Oxley modeling approach to enhance the prediction accuracy. The predicted results are compared with experimental data obtained from the orthogonal cutting tests performed with carbide cutting tools on AISI 1045 steel workpiece. Finally, it is determined that the predictions of the improved version of the extended Oxley modeling approach are in a better agreement with the experimental data than the results of the extended original version.

**Keywords:** shear plane, material model, Oxley's model, tool–chip interface, machining

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author

<sup>1</sup> Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Bilecik, Türkiye - mehmet.aydin@bilecik.edu.tr

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalat, havacılık, otomotiv ve kalıp endüstrilerinde en yaygın olarak kullanılan karmaşık bir üretim yöntemidir. Kesme sırasında iş parçası malzemesi şekil değiştirme hızı ve sıcaklıkların etkisiyle önemli ölçüde deformasyona uğramaktadır. Diğer süreçlerde olduğu gibi, amaç, bir parçayı daha kaliteli, hızlı ve ucuz şekilde elde edebilmektir. Bu ihtiyaçları karşılamak için düşük hesaplama maliyetine sahip kesme koşulları ve kesici takım geometrilerinin geniş bir aralığının test edilmesine olanak sağlayan çeşitli talaşlı imalat süreç modelleri geliştirilmiş, böylece kesme kuvvetleri, titreşimler ve kesme sıcaklıklarının elde edilmesi ve takım aşınması ve iş parçası yüzey kalitesinin nicel analizinin gerçekleştirilmesi kolaylaştırılmıştır.

Süreç modelleri kullanılarak yüksek kesme kuvvetleri, titreşimler ve sıcaklıklar verimlilikten ödün vermeden önlenabilir, hatta verimliliği artırarak ortadan kaldırılabilir. Oxley [1] dik kesme süreç değişkenlerinin tahmini için şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığın akış gerilmesi üzerindeki etkilerini inceleyerek kayma çizgisi yöntemine dayalı paralel kenarlı kayma bölgesi teorisini geliştirmiştir. Oxley talaş kaldırma teorisi olarak bilinen bu model kesici takım geometrisini ve kesme koşullarını inceleyerek kayma açısı, kesme kuvvetleri ve diğer süreç çıktılarını tahmin etmek için iş parçası malzemesinin termal özelliklerini ve üs yasası akış gerilmesi denklemini kullanmaktadır. Kristyanto vd [2] karbon çelikleri ve alüminyum alaşımlarının üs kanunu akış gerilmesi denklemlerini Oxley'in modeline uygulayarak araştırılabilir malzeme çeşitliliğini arttırmışlardır. Ancak, literatürde yalnızca birkaç malzeme için böyle akış gerilmesi ilişkisi bulunmaktadır [3].

Huang ve Liang [4] Oxley'in talaş kaldırma teorisini geliştirmek için hareketli ısı kaynağı yöntemini [5] ve iyileştirilmiş Johnson–Cook malzeme denklemini [6] kullanarak kayma düzlemi ve takım–talaş arayüzündeki sıcaklık dağılımlarını modellemişlerdir. Geliştirilen model kübik bor nitrür (CBN) kesici takımlarla sertleştirilmiş iş parçası malzemelerinin tornalanmasında kesme kuvvetlerini tahmin etmek için uygulanmıştır. Ancak, bu model ikincil deformasyon bölgesindeki şekil değiştirmenin etkisini içermemektedir. Abidi-Sedeh vd [7,8] kesme kuvvetlerini ve sıcaklıkları tahmin etmek için Johnson–Cook malzeme modelini [9],

geçmiş–bağımlı üs kanunu modelini ve mekanik eşik gerilme modelini kullanarak Oxley'in talaş kaldırma modelinde değişiklik yapmışlardır. Takım–talaş arayüzündeki şekil değiştirmenin etkisini inceledikleri çalışmalarının sonucunda Johnson–Cook malzeme modelinin kesme kuvvetlerinin tahmininde en iyi performansı sağladığını tespit etmişlerdir. Özel ve Zeren [10] uniform olmayan talaş yüzeyi normal gerilme dağılımını ve üçgen şeklinde ikincil deformasyon bölgesini inceleyerek Oxley modeline değişiklikler sunmuşlardır. Lalwani vd [11] kesme kuvvetlerini ve sıcaklıkları daha basit bir yaklaşımla tahmin etmek için Oxley'in modeline Johnson–Cook malzeme modelini dahil etmişlerdir. Xiong vd [12] daha iyi tahmin hassasiyeti ve verimliliği ile kesme kuvvetlerini, ilerleme kuvvetlerini ve talaş kalınlığını hesaplamak için genişletilmiş Oxley modelinin algoritmasını değiştirmişlerdir. Chen vd [13] Johnson–Cook malzeme modelini ve termal bir model kullanarak Oxley'in teorisini çelik, alüminyum ve titanyum alaşımlarına uygulamışlardır.

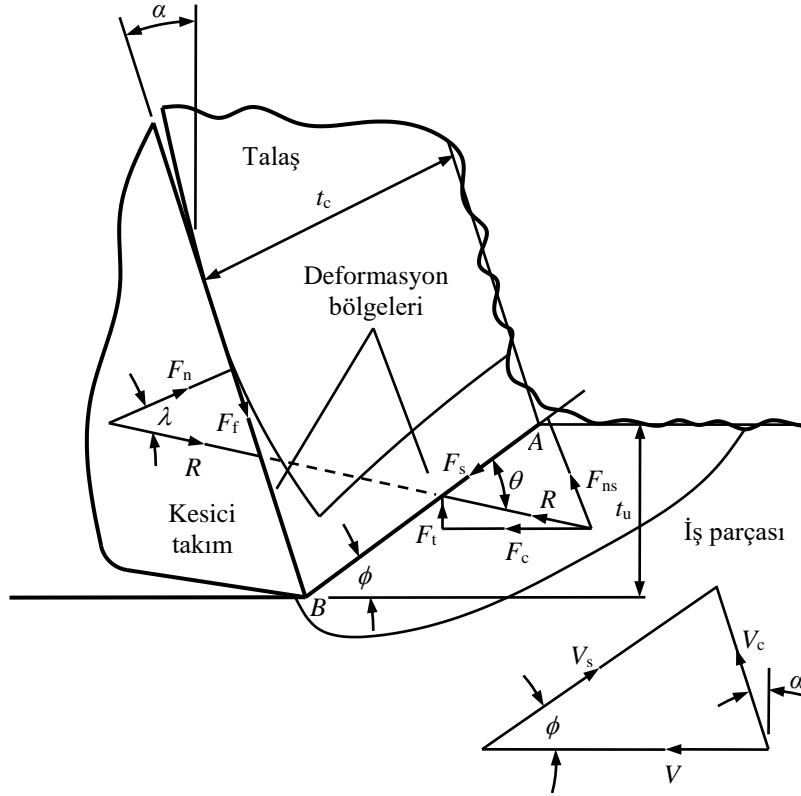
Bu çalışmada, kesici takım geometrisi ve kesme koşullarına göre dik kesme süreç değişkenlerinin hesaplanmasını sağlayan Oxley modelleme yaklaşımı ele alınmıştır. Geliştirilen model, Lalwani vd'nin süreç değişkenlerini tahmin etmek için kullandıkları modeli temel almış, tahmin hassasiyeti ve verimliliği arttırmak için yeni bir yaklaşım geliştirilmiştir. Modeli diğerlerinden gerçeğe daha yakın kılan nokta model parametrelerinin başlangıç değerlerinin eniyilemesi ve sıcaklıkların hesaplanması için yeni bir yöntemin dahil edilmesidir. Ayrıca, iş parçası malzemesi davranışını tanımlamak için Johnson–Cook akış gerilmesi denklemi kullanılmıştır. Şekil değiştirme hızı ve sıcaklığın yanı sıra şekil değiştirmenin ikincil deformasyon bölgesindeki akış gerilmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Daha sonra, geliştirilen modeli doğrulamak için tahmin edilen kesme kuvvetleri ve talaş kalınlıkları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

## 2. OXLEY MODELLEME YAKLAŞIMI (OXLEY MODELING APPROACH)

Oxley modelleme yaklaşımı [1] kayma çizgisi alan analizi ve deneysel akış alanlarının şekil değiştirme hızı analizinden elde edilen talaş oluşumu modeline dayanmaktadır (Şekil 1) ve

yapılan varsayımlar şöyle özetlenebilir: 1) keskin kenarlı bir takım ile sürekli talaş oluşumu için düzlemsel deformasyon ve kararlı durum şartları varsayılır, 2) birincil kayma bölgesinin paralel-kenarlı ve ikincil kayma bölgesinin sabit kalınlığa sahip olduğu varsayılır, 3)  $AB$  kayma düzlemindeki kayma şekil değiştirmesi üniform ve kayma bölgesindeki şekil değiştirmenin yarısına

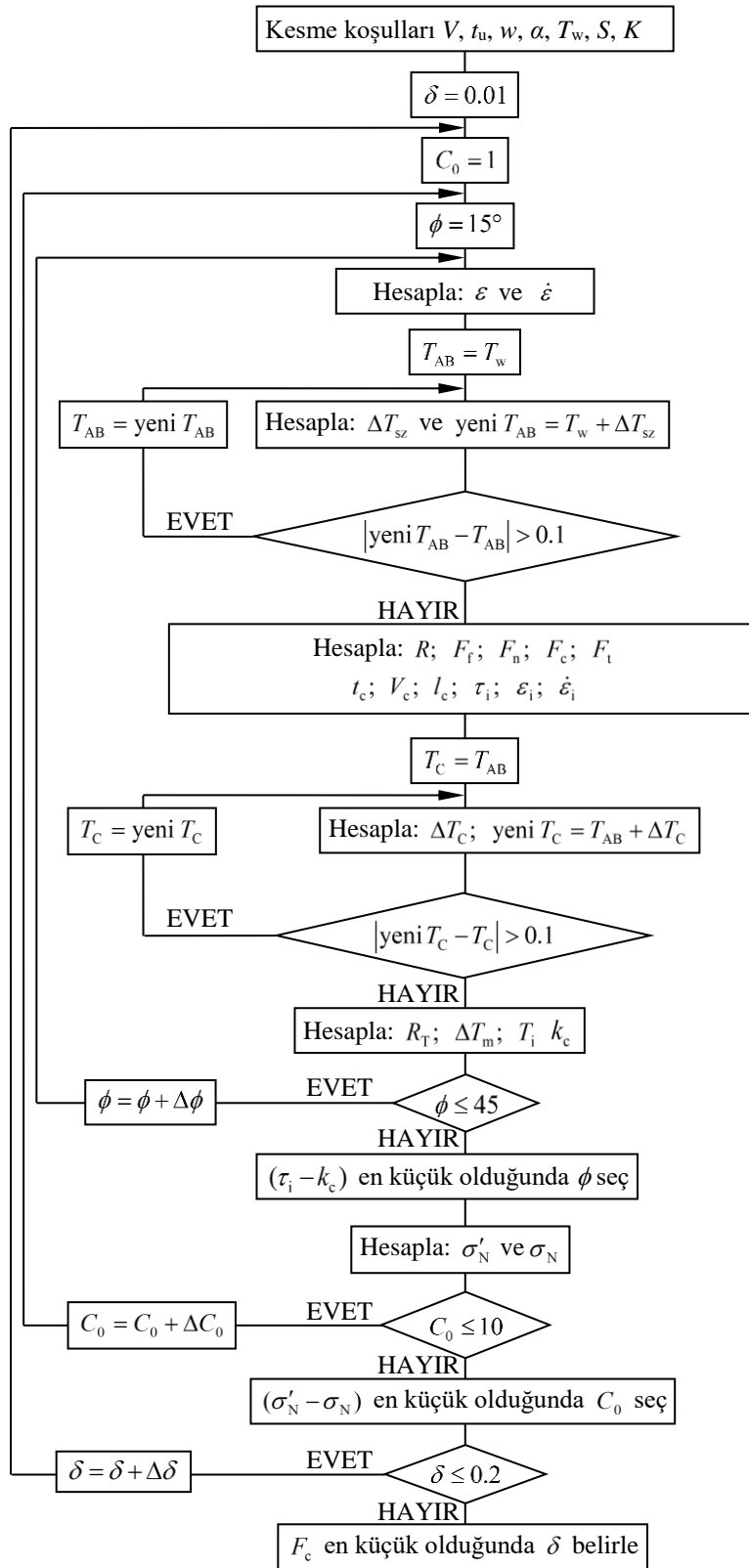
eşittir, 4)  $AB$  boyunca şekil değiştirme ve sıcaklık üniformdur, 5)  $AB$  çizgisi düz bir kayma çizgisidir, 6) en büyük kayma gerilmesi ve kayma şekil değiştirme hızının  $AB$  ve takım–talaş arayüzünde olduğu varsayılır, 7)  $C_0$  ve  $\delta$  sırasıyla kayma bölgesi ve takım-talaş arayüzündeki şekil değiştirme hızı sabitleridir.



Şekil 1. Talaş oluşumu modeli (chip formation model) [1]

Kesme kuvveti ( $F_c$ ), ilerleme kuvveti ( $F_t$ ), kayma kuvveti ( $F_s$ ), sürtünme kuvveti ( $F_f$ ), normal kuvvet ( $F_n$ ), kayma düzlemi sıcaklığı ( $T_{AB}$ ), takım–talaş arayüzü ortalama sıcaklığı ( $T_i$ ), talaş kalınlığı ( $t_c$ ), takım–talaş arayüzündeki ortalama sürtünme açısı ( $\lambda$ ), kayma düzlemindeki gerilme ( $k_{AB}$ ) ve kayma düzlemi uzunluğu ( $l_{AB}$ ) gibi parametreleri elde etmek için  $x = [\phi, C_0, \delta]$  belirlenmelidir. Xiong vd [12] tarafından önerilen çözüme dayanarak, takım–talaş arayüzündeki şekil değiştirme hızı sabiti ( $\delta$ ), kayma bölgesindeki şekil değiştirme hızı sabiti ( $C_0$ ) ve kayma açısı ( $\phi$ ) başlangıç değerleri tahmin verimliliğini arttırmak ve AISI 1045 çelik için kuvvet dengesini sağlamak için

sırasıyla 0.01, 1 ve  $15^\circ$  olarak tayin edilmiştir. Yukarıda ifade edildiği gibi, süreç parametreleri takım–talaş arayüzündeki şekil değiştirme hızı sabiti ( $\delta$ ), kayma bölgesindeki şekil değiştirme hızı sabiti ( $C_0$ ) ve kayma açısına ( $\phi$ ) bağlı olup, Oxley'in modelinin çözüm prosedürü Şekil 2'de verilen akış şeması ile gösterilmiştir.  $\phi$  takım–talaş arayüzü kayma gerilmesi [ $\tau_1(x)$ ] talaşın kayma akış gerilmesine [ $k_c(x)$ ] eşit olduğunda belirlenir.  $C_0$  takım–talaş arayüzündeki normal gerilme [ $\sigma_N(x)$ ]  $B$  noktasındaki sınır koşulundan hesaplanan [ $\sigma'_N(x)$ ] gerilme değerine eşit olduğunda belirlenir.  $\delta$  en küçük kesme kuvveti kriterinden belirlenir [en küçük  $F_c(x)$ ].



Şekil 2. Oxley modelleme yaklaşımının akış şeması (Flow chart of Oxley modeling approach)

## 2.1. Malzeme akış gerilmesi modeli (Flow stress model of material)

Oxley'in modelini geliştirmek için şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak iş parçası malzemesi davranışını tanımlayan Johnson-Cook akış

gerilmesi modeli [9] kullanılmıştır. Bu malzeme modeli aşağıdaki ampirik ilişki ile ifade edilebilir:

$$\sigma = (A + B(\epsilon)^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T - T_w}{T_m - T_w} \right)^m \right) \quad (1)$$

burada  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $n$  ve  $m$  burulma, çekme veya Hopkinson çubuk testlerinden elde edilen malzeme sabitleri,  $\sigma$  malzeme akış gerilmesi,  $\epsilon$  eşdeğer şekil değiştirme,  $\dot{\epsilon}$  eşdeğer şekil



değiştirme hızı,  $\dot{\epsilon}_0$  referans Şekil değiştirme hızı,  $T$  anlık sıcaklık,  $T_w$  iş parçası malzemesinin başlangıç sıcaklığı,  $T_m$  iş parçası malzemesinin ergime sıcaklığıdır. Johnson–Cook modelindeki birinci terim Şekil değiştirme sertleşmesini ifade etmektedir. Bu terim içerisindeki  $A$  malzemenin akma gerilmesi ve  $B$  dayanım katsayısıdır. İkinci terim malzeme yüksek Şekil değiştirme hızı ile yüklendiğinde akış gerilmesinin artacağını göstermektedir. Son terim sıcaklık arttıka malzemenin akış gerilmesinin azalacağını temsil etmektedir.  $(T-T_w)/(T_m-T_w)$  normalize edilen sıcaklık olarak bilinir ve  $T^*$  ile gösterilir.

## 2.2. Birincil kayma bölgesi (Primary shear zone)

Kayma düzlemindeki eşdeğer kayma akış gerilmesi ( $k_{AB}$ ) Johnson–Cook modeli kullanılarak Von Mises kriterine göre aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$k_{AB} = \frac{1}{\sqrt{3}}(A + B\epsilon_{AB}^n) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}_{AB}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left( 1 - \left( \frac{T_{AB} - T_w}{T_m - T_w} \right)^m \right) \quad (2)$$

burada AISI 1045 elik için  $A = 553.1$  MPa,  $B = 600.8$  MPa,  $n = 0.234$ ,  $C = 0.0134$ ,  $m = 1$  ve  $T_m = 1460$  [14].  $\epsilon_{AB}$  ve  $\dot{\epsilon}_{AB}$  sırasıyla eşdeğer Şekil değiştirme ve Şekil değiştirme hızıdır ve  $T_{AB}$   $AB$  düzlemindeki ortalama sıcaklıktır.  $\epsilon_{AB}$  ve  $\dot{\epsilon}_{AB}$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_{AB} &= \frac{\gamma_{AB}}{\sqrt{3}} = \frac{\cos \alpha}{2\sqrt{3} \sin \phi \cos(\phi - \alpha)} \\ \dot{\epsilon}_{AB} &= \frac{\dot{\gamma}_{AB}}{\sqrt{3}} = C_0 \frac{V_s}{\sqrt{3}l_{AB}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

burada  $\gamma_{AB}$  ve  $\dot{\gamma}_{AB}$  sırasıyla  $AB$  düzlemindeki en büyük kayma Şekil değiştirme ve Şekil değiştirme hızıdır.  $l_{AB}$  kayma düzleminin uzunluğu,  $\phi$  kayma açısı ve  $\alpha$  talaş açısıdır.  $V_s$  kayma hızıdır ve kesme hızı ( $V$ ) ve aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir:

$$V_s = \frac{\cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} V. \quad (4)$$

Kayma düzlemindeki ( $AB$ ) ortalama sıcaklık kayma bölgesinde yapılan işi inceleyerek bulunur ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$E_j = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{F_{c,i,j} - F_{c,i}}{F_{c,i}} \right)^2 + \left( \frac{F_{t,i,j} - F_{t,i}}{F_{t,i}} \right)^2 + \left( \frac{T_{int,i,j} - T_{int,i}}{T_{int,i}} \right)^2 + \left( \frac{t_{c,i,j} - t_{c,i}}{t_{c,i}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$E_k =$  en küçük ( $E_j$ ) olmak üzere  $\eta = \eta_k$  dir.

$$T_{AB} = T_w + \eta \frac{1 - \beta_T}{\rho S t_u w} \frac{F_s \cos \alpha}{\cos(\phi - \alpha)} \quad (5)$$

burada sağ taraftaki ikinci terim kayma deformasyonundan dolayı  $AB$  düzlemindeki sıcaklık artışıdır.  $\eta$  toplam kayma deformasyon enerjisi yüzdesi,  $\rho$  ve  $S$  iş parçası malzemesi yoğunluğu ve özgül ısıısı,  $t_u$  deforme olmamış talaş kalınlığı,  $w$  kesme genişliği,  $\beta_T$  kayma bölgesinden iş parçasına iletilen ısı miktarıdır ve aşağıdaki ampirik denklem ve boyutsuz termal sayı ( $R_T$ ) ifadesinden bulunur:

$$\beta_T = 0.5 - 0.35 \log(R_T \tan \phi) \quad \text{için} \quad 0.04 \leq R_T \tan \phi \leq 10$$

$$\beta_T = 0.3 - 0.15 \log(R_T \tan \phi) \quad \text{için} \quad R_T \tan \phi > 10 \quad (6)$$

$$R_T = \frac{\rho S V t_u}{K} \quad (7)$$

burada  $K$  iş parçası malzemesi ısı iletkenliğidir.

Birincil deformasyon bölgesinde ortalama eşdeğer kayma akış gerilmesi olarak  $k_{AB}$  alınarak kayma kuvveti ( $F_s$ ) tayin edilebilir:

$$F_s = \frac{k_{AB} t_u w}{\sin \phi}. \quad (8)$$

Xiong vd [12] sıcaklık faktörlerinin ( $\eta/\psi$ ) tahmin hassasiyeti üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu çalışmada, kayma düzlemi sıcaklığını ( $T_{AB}$ ) hesaplamak için  $\eta$  sıcaklık faktörü deneysel verilerle tahmin edilen sonuçlar karşılaştırılarak belirlenmiştir.

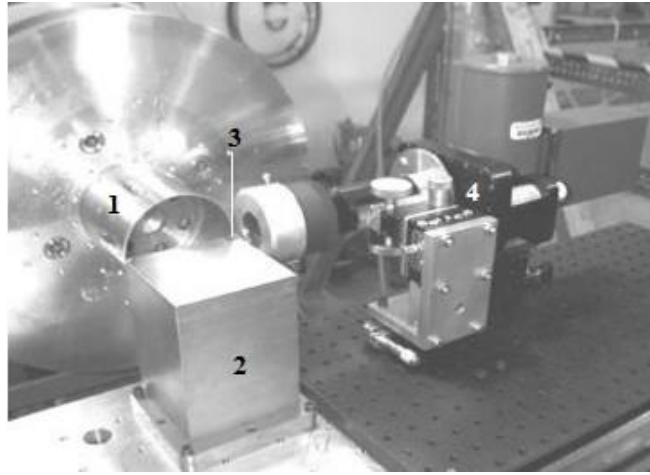
$\eta$  sıcaklık faktörünü belirlemek için  $\alpha = \alpha_i$ ,  $t_c = t_{c,i}$ ,  $V = V_i$ ,  $w = w_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots, N$ ) kesme koşullarında elde edilen kesme kuvveti ( $F_c = F_{c,i}$ ), ilerleme kuvveti ( $F_t = F_{t,i}$ ), takım–talaş arayüzü ortalama sıcaklığı ( $T_i = T_{i,i}$ ) ve talaş kalınlığı ( $t_c = t_{c,i}$ ) incelenmiştir.

$\eta = \eta_j$  ( $j = 1, 2, 3, \dots, M$ ) için deneysel verilere göre tahmin sonuçlarının ( $F_{c,i,j}$ ,  $F_{t,i,j}$ ,  $T_{i,i,j}$ , ve  $t_{c,i,j}$ ) bağlı hatalarının karesel toplamı ( $E$ ) aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$\eta$  sıcaklık faktörünü belirlemek için Ivester vd [15] tarafından elde edilen deneysel veriler

kullanılmıştır. Bu dik işleme testi için koşullar: iş parçası malzemesi AISI 1045 çeliği; kesici takımlar  $-7^\circ$  ve  $+5^\circ$  talaş açısına sahip kaplamasız tungsten karbür uçlardır. Kesme hızı 200 ve 300

m/dak, ilerleme hızı 0.15 ve 0.30 mm/dev ve kesme genişliği 1.6 mm seçilmiştir. Şekil 3 malzemenin iki boyutlu akışını oluşturan deneysel sistemi göstermektedir. İş parçası malzemesinin termo-fiziksel özellikleri de Tablo 1’de verilmiştir.

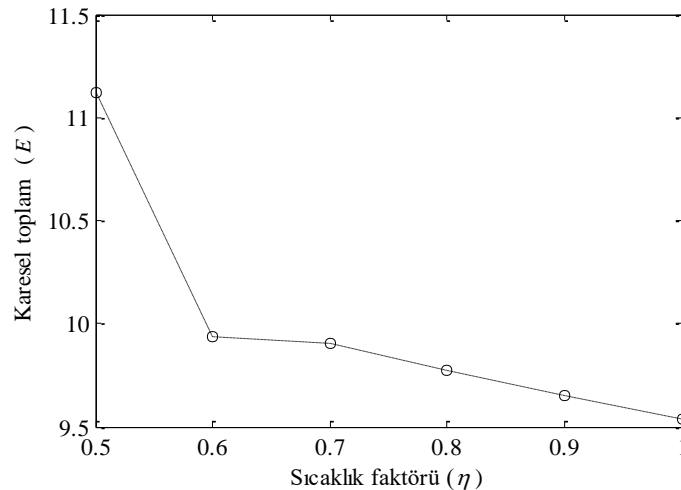


Şekil 3. Deneysel sistem: 1) iş parçası; 2) takım tutucu; 3) tungsten karbür uç; 4) mikro pirometre (Experimental system: 1) workpiece; 2) tool post; 3) tungsten carbide insert; 4) micro pyrometry) [15]

Tablo 1. AISI 1045 iş parçası malzemesinin termo-fiziksel özellikleri (The thermo-physical properties of AISI 1045 workpiece) [1]

Yoğunluk ( $\rho$ ) kg/m <sup>3</sup>	Isıl İletkenlik ( $\lambda$ ) (W/mK)	Özgül ısı ( $S$ ) J/kgK
7850	52.61-0.0281T	420+0.504T

$\eta = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$  ve  $\psi = 0.75$  [12] varsayılarak yukarıdaki yöntemle  $\eta = 1.0$  olarak tespit edilmiştir. Şekil 4 sıcaklık faktörü ( $\eta$ ) ve bağıl hataların karesel toplamı ( $E$ ) arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 4. Sıcaklık faktörü ( $\eta$ ) ve karesel toplam ( $E$ ) arasındaki ilişki (The relation between temperature factor ( $\eta$ ) and quadratic sum ( $E$ ))

### 2.3. İkincil kayma bölgesi (Secondary shear zone)

Takım–talaş arayüzündeki kayma akış gerilmesi ( $k_c$ ) Johnson–Cook modeli ve Von Mises kriteri kullanılarak belirlenir:

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{3}}(A + B\varepsilon_i^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_i}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left(1 - \left(\frac{T_i - T_w}{T_m - T_w}\right)^m\right) \quad (10)$$

burada  $\varepsilon_i$  ve  $\dot{\varepsilon}_i$  sırasıyla takım–talaş arayüzündeki eşdeğer şekil değiştirme ve şekil değiştirme hızıdır ve  $T_i$  arayüzdeki ortalama sıcaklıktır.

Takım–talaş arayüzündeki eşdeğer kayma şekil değiştirme aşağıdaki gibi ifade edilir [16]:

$$\varepsilon_i = \frac{\gamma_i}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}}(2\gamma_{AB} + 0.5 \frac{l_c}{\delta t_c}) \quad (11)$$

burada  $\gamma_i$  takım–talaş arayüzündeki en büyük kayma şekil değiştirme,  $t_c$  talaş kalınlığı,  $l_c$  takım–talaş temas uzunluğudur.

Takım–talaş arayüzündeki üçgen ikincil deformasyon bölgesi  $\delta t_c$  kalınlığına sahip dikdörtgen plastik bölge olarak varsayılır ve takım–talaş arayüzündeki eşdeğer şekil değiştirme hızı Von Mises kriterine göre aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\dot{\varepsilon}_i = \frac{\dot{\gamma}_i}{\sqrt{3}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{V_c}{\delta t_c} \quad (12)$$

burada  $V_c$  talaş hızıdır,  $t_c$  ve  $V_c$  geometrik ilişkilere göre hesaplanabilir:

$$t_c = \frac{t_u \cos(\phi - \alpha)}{\sin \phi} \quad (13)$$

$$V_c = \frac{\sin \phi}{\cos(\phi - \alpha)} V. \quad (14)$$

Temel kuvvet ilişkileri dikkate alınarak kuvvet bileşenleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\left. \begin{aligned} F_c &= R \cos(\lambda - \alpha), \quad F_t = R \sin(\lambda - \alpha) \\ F_f &= R \sin \lambda, \quad F_n = R \cos \lambda \\ R &= \frac{F_s}{\cos \theta} = \frac{k_{AB} t_u w}{\sin \phi \cos \theta} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

burada  $\theta$  bileşke kuvvet ( $R$ ) ve kayma düzlemi ( $AB$ ) arasındaki açıdır. Oxley  $AB$  boyunca normal gerilme dağılımını lineer varsayarak aşağıdaki ilişkiyi elde etmiştir:

$$\tan \theta = 1 + 2 \left( \frac{\pi}{4} - \phi \right) - \left( \frac{dk}{ds_2} \right)_{AB} \frac{l_{AB}}{2k_{AB}} \quad (16)$$

burada  $(dk/ds_2)_{AB}$  paralel kenarlı kayma bölgesi genişliği boyunca kayma akış gerilmesindeki değişimdir ve  $(dk/ds_2)_{AB} (l_{AB}/2k_{AB})$  aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\left( \frac{dk}{ds_2} \right)_{AB} \frac{l_{AB}}{2k_{AB}} = \left( \frac{1}{3} \frac{d\sigma_{AB}}{d\varepsilon_{AB}} \right) \left( \frac{C_0 V_s}{l_{AB}} \right) \left( \frac{1}{V \sin \phi} \right) \frac{l_{AB}}{2k_{AB}}. \quad (17)$$

$(V_s/V \sin \phi) = 2\sqrt{3}\varepsilon_{AB}$  ve  $k_{AB} = \sigma_{AB}/\sqrt{3}$  Denklem 17'ye yerleştirildiğinde aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\left( \frac{dk}{ds_2} \right)_{AB} \frac{l_{AB}}{2k_{AB}} = C_0 \left( \frac{d\sigma_{AB}}{d\varepsilon_{AB}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{AB}}{\sigma_{AB}} \right) \quad (18)$$

burada

$$n_{eq} = \left( \frac{d\sigma_{AB}}{d\varepsilon_{AB}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{AB}}{\sigma_{AB}} \right). \quad (19)$$

Denklem 18, Denklem 16'ya yerleştirildiğinde  $\theta$  açısı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\tan \theta = 1 + 2 \left( \frac{\pi}{4} - \phi \right) - C_0 n_{eq}. \quad (20)$$

Johnson–Cook malzeme modeli için  $d\sigma_{AB}/d\varepsilon_{AB}$  aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_{AB}}{d\varepsilon_{AB}} &= nB\varepsilon_{AB}^{n-1} \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{AB}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) (1 - T_{AB}^{*m}) \\ &+ (A + B\varepsilon_{AB}^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_{AB}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left( \frac{-m}{(T_{AB} - T_w)} \right) T_{AB}^{*m} \left( \frac{\beta_T \sigma_{AB}}{\rho S} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Denklem 21, Denklem 19'a yerleştirildiğinde şekil değiştirme sertleşmesi katsayısı ( $n_{eq}$ ) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$n_{eq} = \left[ \frac{nB\varepsilon_{AB}^n}{(A + B\varepsilon_{AB}^n)} - \varepsilon_{AB} \left( \frac{m}{(T_{AB} - T_w)} \right) \left( \frac{T_{AB}^{*m}}{1 - T_{AB}^{*m}} \right) \left( \frac{\beta_T \sigma_{AB}}{\rho S} \right) \right] \quad (22)$$

burada  $1/\rho S \cong 0$  dır.

Sonuç olarak, yukarıdaki yaklaşım [11] kullanılarak  $n_{eq}$  aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$n_{eq} \approx \frac{nB\varepsilon_{AB}^n}{(A + B\varepsilon_{AB}^n)}. \quad (23)$$

Takım–talaş arayüzü boyunca normal gerilmenin üniform olduğu varsayılarak takım–talaş arayüzdeki ortalama normal gerilme ( $\sigma_N$ ) ve takım–talaş arayüzü boyunca yapışma sürtünmesi oluştuğunu varsayarak ortalama kayma gerilmesi ( $\tau_{nt}$ ) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\sigma_N = \frac{F_n}{l_c w} \quad (24)$$

$$\tau_{\text{int}} = \frac{F_f}{l_c w} \quad (25)$$

burada takım–talaş arayüzü uzunluğu ( $l_c$ )  $AB$  düzleminde normal gerilmelerin  $B$  noktasına göre momenti alınarak hesaplanır:

$$l_c = \frac{t_u \sin \theta}{\cos \lambda \sin \phi} \left( 1 + \frac{C_0 n_{\text{eq}}}{3 \left[ 1 + 2 \left( \frac{\pi}{4} - \phi \right) - C_0 n_{\text{eq}} \right]} \right) \quad (26)$$

burada sürtünme açısı ( $\lambda$ ) aşağıdaki denklemle bulunabilir:

$$\lambda = \theta - \phi + \alpha. \quad (27)$$

Normal gerilme ( $\sigma'_N$ )  $B$  noktasındaki sınır koşulu incelenerek hesaplanabilir:

$$\sigma'_N = k_{\text{AB}} \left( 1 + \frac{\pi}{2} - 2\alpha - 2C_0 n_{\text{eq}} \right). \quad (28)$$

Takım–talaş arayüzündeki ortalama sıcaklık ( $T_i$ ) aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır:

$$T_i = T_{\text{AB}} + \psi \Delta T_M \quad (29)$$

burada AISI 1045 çelik için  $\psi$  sıcaklık faktörü, yukarıda  $\eta$  sıcaklık faktörü için önerilen yöntemle benzer bir yaklaşımla deneysel verilerle tahmin edilen sonuçları karşılaştırarak 0.75 olarak belirlenmiştir [12]. Boothroyd [17] talaştaki en büyük sıcaklık artışını ( $\Delta T_M$ ) bulmak için arayüzde dikdörtgen ısı kaynağı varsayarak aşağıdaki denklemi önermiştir:

$$\log \left( \frac{\Delta T_M}{\Delta T_C} \right) = 0.06 - 0.195 \delta \sqrt{\frac{R_T t_c}{l_c}} + 0.5 \log \left( \frac{R_T t_c}{l_c} \right) \quad (30)$$

burada  $\Delta T_C$  talaşın ortalama sıcaklık artışıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\Delta T_C = \frac{F_f V_c}{\rho V t_u w K}. \quad (31)$$

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Oxley'in geliştirilen modelleme yaklaşımı için kesme koşulları ve iş parçası malzemesi özellikleri girdi parametreleridir. Süreç benzetimlerinde iş parçası malzemesinin ısıl iletkenliği ve özgül ısısı sıcaklığa bağlı olarak değiştirilmiştir. Hesaplama verimliliğini artırmak için  $\phi$ ,  $C_0$ ,  $\delta$  model parametrelerinin başlangıç değerleri birkaç süreç benzetimden sonra 15°, 1 ve 0.01 olarak tayin edilmiştir. Tahmin hassasiyetini yükseltmek için deneysel verilerle tahmin edilen sonuçların

karşılaştırılması ile AISI 1045 çelik için  $\eta$  sıcaklık faktörü 1 olarak belirlenmiştir. Kayma açısı, talaş kalınlığı, kesme kuvveti ve takım–talaş arayüzündeki ortalama sıcaklık gibi süreç değişkenleri modelden elde edilen sonuçlardır. Deneysel veriler AISI 1045 çeliği iş parçası malzemesi üzerinde gerçekleştirilen dik kesme testlerinden elde edilmiştir [15].

Tablo 2 Ivester vd'nin kesme koşullarında [15] Oxley'in genişletilmiş modelinin iyileştirilen versiyonundan tahmin edilen süreç değişkenlerini göstermektedir. Tablo 3'de Lalwani vd tarafından sunulan orijinal model [11] ve iyileştirilen model kullanılarak hesaplanan kesme kuvvetleri ( $F_{c,O}$ ,  $F_{c,I}$ ), ilerleme kuvvetleri ( $F_{t,O}$ ,  $F_{t,I}$ ) ve talaş kalınlıkları ( $t_{c,O}$ ,  $t_{c,I}$ ) karşılaştırılmış ve  $\Delta F_c$ ,  $\Delta F_t$  ve  $\Delta t_c$  bağıl hataları listelenmiştir. Tablo3'de görüldüğü gibi,  $F_c$ ,  $F_t$  ve  $t_c$  için en büyük bağıl hata sırasıyla %17.4, %61.3 ve % 29.4 olarak tespit edilmiştir. Bu fark geliştirilen modeldeki iyileştirilmelerden elde edilen daha yüksek tahmin hassasiyetinin sonucudur.

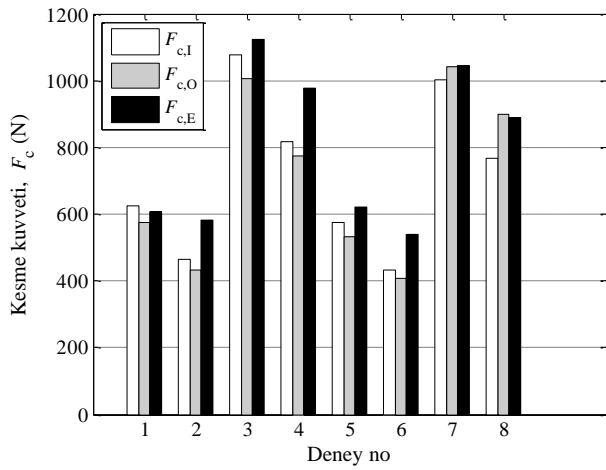
Oxley'in geliştirilen modelinin tahmin hassasiyeti üzerindeki etkisini incelemek için Oxley'in geliştirilen kestirimci işleme modelinden hesaplanan süreç tahminleri ve orijinal modelden tahmin edilen sonuçlar [11] AISI 1045 çeliği iş parçası malzemesinin karbür uçlarla işlendiği deneylerde bulunan veriler [15] ile de karşılaştırılmıştır. Şekil 5, 6 ve 7 Lalwani vd'nin tahmin sonuçları [11] ve Ivester vd'nin deneysel sonuçları [15] ile geliştirilen modelden tahmin edilen kesme kuvveti ( $F_c$ ), ilerleme kuvveti ( $F_t$ ) ve talaş kalınlığı ( $t_c$ ) değerlerinin karşılaştırmalarını göstermektedir. Lalwani vd'nin tahminlerine göre geliştirilen modelden elde edilen kesme kuvveti ( $F_c$ ), ilerleme kuvveti ( $F_t$ ) ve talaş kalınlığı ( $t_c$ ) değerleri deneysel sonuçlara daha yakındır. Başka bir deyişle, kesme sıcaklığının hesaplanması için yapılan öneriler kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve talaş kalınlığının daha memnuniyet verici sonuçlarının elde edilmesini sağlamıştır. Bu sonuçlara dayanarak geliştirilen modelin daha yüksek tahmin hassasiyeti sağladığı sonucu çıkarılabilir.

Tablo 2. Geliştirilen Oxley modelleme yaklaşımından tahmin edilen sonuçlar (Predicted results from the improved Oxley modeling approach)

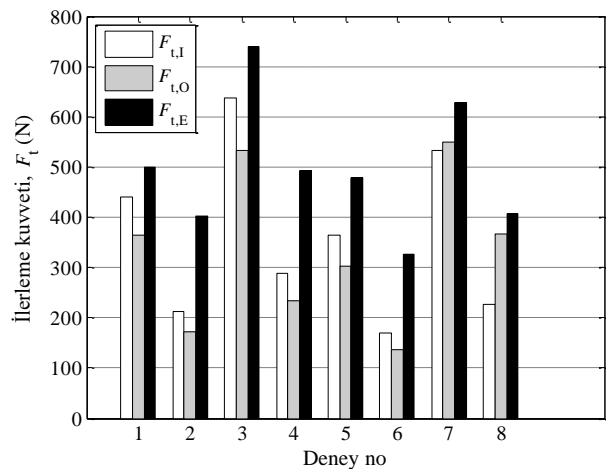
Test	1	2	3	4	5	6	7	8
$V$ (m/dak)	200	200	200	200	300	300	300	300
$t_u$ (mm)	0.15	0.15	0.30	0.30	0.15	0.15	0.30	0.30
$\alpha$ (°)	-7	5	-7	5	-7	5	-7	5
$\delta$	0.0504	0.0604	0.0304	0.0304	0.0404	0.4040	0.0244	0.0204
$C_0$	6.0060	4.5540	5.7070	4.0380	5.8240	4.2310	5.5470	3.7530
$\phi$	16.404	24.796	19.532	28.432	18.294	27.062	21.306	30.506
$\varepsilon_{AB}$	1.1055	0.7287	0.9578	0.6582	1.0096	0.6820	0.8956	0.6276
$\dot{\varepsilon}_{AB}$ (s <sup>-1</sup> )	23536	25944	13579	13391	38623	39820	21864	20234
$\varepsilon_{int}$	8.8369	6.5801	12.517	10.958	10.102	8.7604	14.776	15.241
$\dot{\varepsilon}_{int}$ (s <sup>-1</sup> )	24106	42202	29467	56820	57417	114790	67167	149220
$T_{AB}$ (°C)	407.39	313.12	383.10	300.77	393.31	306.30	374.64	297.80
$T_{int}$ (°C)	895.07	815.74	992.44	941.15	947.81	891.20	1049.8	1018.0
$n_{eq}$	0.1232	0.1175	0.1212	0.1161	0.1219	0.1166	0.1203	0.1154
$\theta$ (°)	51.523	49.482	50.125	47.970	50.703	48.563	49.227	47.006
$F_c$ (N)	625.42	464.69	1077.7	816.02	574.55	431.67	1003.6	766.03
$F_t$ (N)	439.86	213.60	637.19	289.58	364.74	170.05	531.84	226.91
$t_c$ (mm)	0.48745	0.33653	0.80281	0.57814	0.43206	0.30556	0.72693	0.53339
$l_c$ (mm)	0.56388	0.36069	0.89624	0.58698	0.48875	0.31629	0.79783	0.52715
$k_{AB}$ (MPa)	559.81	580.63	559.09	575.03	563.73	582.05	561.49	576.16
$\tau_{int}$ (MPa)	399.43	438.90	349.44	382.89	373.41	409.09	317.71	347.16
$\sigma'_N$ (MPa)	747.45	769.91	800.18	838.69	786.10	820.44	831.12	881.30

Tablo 3. Orijinal ve Oxley'in geliştirilen modelinden hesaplanan sonuçların karşılaştırması (comparison of results computed from the original and the improved Oxley's model)

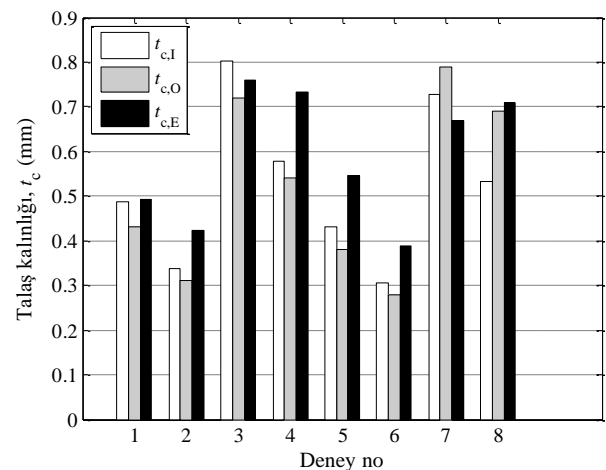
Test	$F_{c,I}$ (N)	$F_{c,O}$ (N)	$\Delta F_c$ (%)	$F_{t,I}$ (N)	$F_{t,O}$ (N)	$\Delta F_t$ (%)	$t_{c,I}$ (mm)	$t_{c,O}$ (mm)	$\Delta t_c$ (%)
1	625.42	576	-7.9	439.86	364	-17.2	0.48745	0.43	-11.8
2	464.69	433	-6.8	213.60	171	-19.9	0.33653	0.31	-7.9
3	1077.7	1007	-6.6	637.19	533	-16.4	0.80281	0.72	-10.3
4	816.02	773	-5.3	289.58	233	-19.5	0.57814	0.54	-6.6
5	574.55	533	-7.2	364.74	302	-17.2	0.43206	0.38	-12.0
6	431.67	406	-5.9	170.05	136	-20.0	0.30556	0.28	-8.4
7	1003.6	1041	3.7	531.84	550	3.4	0.72693	0.79	8.7
8	766.03	899	17.4	226.91	366	61.3	0.53339	0.69	29.4



Şekil 5. Lalwani vd'nin tahminleri ( $F_{c,O}$ ) ve deneysel veriler ( $F_{c,E}$ ) ile tahmin edilen kesme kuvvetlerinin ( $F_{c,I}$ ) karşılaştırması (Comparison of the predicted cutting forces ( $F_{c,I}$ ) with the predictions ( $F_{c,O}$ ) of Lalwani et al. and experimental data ( $F_{c,E}$ ))



Şekil 6. Lalwani vd'nin sonuçları ( $F_{t,O}$ ) ve deneysel veriler ( $F_{t,E}$ ) ile tahmin edilen ilerleme kuvvetlerinin ( $F_{t,I}$ ) karşılaştırması (Comparison of the predicted thrust forces ( $F_{t,I}$ ) with the results ( $F_{t,O}$ ) of Lalwani et al. and experimental data ( $F_{t,E}$ ))



Şekil 7. Lalwani vd'nin tahmin sonuçları ( $t_{c,O}$ ) ve deneysel veriler ( $t_{c,E}$ ) ile tahmin edilen talaş kalınlıklarının ( $t_{c,I}$ ) karşılaştırması (Comparison of the predicted chip thicknesses ( $t_{c,I}$ ) with the prediction values ( $t_{c,O}$ ) of Lalwani et al. and experimental data ( $t_{c,E}$ ))

## 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, süreç değişkenlerinin yüksek doğruluk ve verimlilikle hesaplanması için Oxley'in kestirimci talaş kaldırma teorisi incelenmiştir. Şekil değiştirme sertleşmesi katsayısını ( $n_{eq}$ ) içeren Oxley modelleme yaklaşımının tahmin hassasiyeti ve verimliliğini artırmak amacıyla model parametreleri için uygun başlangıç değerleri belirlenmiş ve bir sıcaklık hesaplama yöntemi önerilmiştir. Ayrıca, hem iş parçası malzemesi davranışını tanımlamak hem de modeli genelleştirmek için Johnson–Cook akış gerilmesi denklemi geliştirilen Oxley modelleme yaklaşımına dahil edilmiş ve şekil değiştirme hızı ve sıcaklığın yanı sıra şekil değiştirme hızı takım–talaş arayüzündeki akış gerilmesi üzerindeki etkisi hesaba katılmıştır. Oxley'in iyileştirilen talaş kaldırma modeli karbür kesici takımlarla AISI 1045 çeliği iş parçası malzemesinin işlenmesi için uygulanmış, bulunan değerler literatürde sunulan deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Oxley'in iyileştirilen modelinden deneysel verilere daha yakın kesme kuvveti, ilerleme kuvveti ve talaş kalınlığı sonuçları elde edilmiştir. Kayma bölgesi ve takım–talaş arayüzündeki sıcaklıkları hesaplamak için önerilen yaklaşım modelin tahmin hassasiyetini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu çalışma yardımıyla talaşlı imalat süreç değişkenleri tahmin edilebilir ve böylece uygun kesici takımların tasarlanması ve talaş kaldırma sürecinin eniyelenmesi gerçekleştirilebilir.

## KAYNAKÇA (REFERENCES)

- [1] P.L.B. Oxley, *The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability*. Chichester, England: Ellis Horwood, 1989.
- [2] B. Kristyanto, P. Mathew, J.A. Arsecularatne, "Determination of material properties of aluminum from machining tests," in *ICME 2000–8th International Conference on Manufacturing Engineering*, Sydney, 2000, pp. 27–30.
- [3] H. Li, J. Wang, "A cutting forces model for milling Inconel 718 alloy based on a material constitutive law," *Proc. Inst. Mech. Eng. C. J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 227, pp. 1761–1775, 2012.
- [4] Y. Huang, S.Y. Liang, "Cutting forces modeling considering the effect of tool

- thermal property—application to CBN hard turning.” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 43, pp. 307–315, 2003.
- [5] Y. Huang, S.Y. Liang, “Cutting temperature modeling based on non-uniform heat intensity and partition ratio,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 9, pp. 301–323, 2005.
- [6] M. Shatla, C. Kerk, T. Altan, “Process modeling in machining, part 1: determination of flow stress data,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, pp. 1511–1534, 2001.
- [7] A.H. Adibi-Sedeh, V. Madhavan, “Effect of some modifications to Oxley’s machining theory and the applicability of different material models,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 6, pp. 379–395, 2002.
- [8] A.H. Adibi-Sedeh, V. Madhavan, B. Bahr, “Extension of Oxley’s analysis of machining to use different material models,” *Trans. ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 125, pp. 656–666, 2003.
- [9] G.R. Johnson, W.H. Cook, “A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures,” *The 7th International Symposium on Ballistics*, Hague, Netherlands, 1983, pp. 541–547.
- [10] T. Özel, E. Zeren, “A methodology to determine work material flow stress and tool–chip interfacial friction properties by using analysis of machining,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 128, pp. 119–129, 2006.
- [11] D.I. Lalwani, N.K. Mehta, P.K. Jain, “Extension of Oxley’s predictive machining theory for Johnson and Cook flow stress model,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, pp. 5305–5312, 2009.
- [12] L. Xiong, J. Wang, Y. Gan, B. Li, N. Fang, “Improvement of algorithm and prediction precision of an extended Oxley’s theoretical model,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 77, pp. 1–13, 2015.
- [13] Y. Chen, H. Li, J. Wang, “Further development of Oxley’s predictive force model for orthogonal cutting,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 86–111, 2015.
- [14] S.P.F.C. Jaspers, J.H. Dautzenberg, “Material behaviour in conditions similar to metal cutting: flow stress in the primary shear zone,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 122, pp.322–330, 2002.
- [15] R.W. Ivester, M. Kennedy, M. Davies, R. Stevenson, J. Thiele, R. Furness, S. Athavale, “Assessment of machining models: progress report,” *Mach. Sci. Technol.*, vol. 4, pp. 511–538, 2000.
- [16] P. Mathew, P.L.B. Oxley, “Predicting the effects of very high cutting speeds on cutting forces, etc.,” *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, vol. 31, pp. 49–52, 1982.
- [17] G. Boothroyd, “Temperatures in orthogonal metal cutting,” *Proc. Inst. Mech. Eng.*, vol. 177, pp. 789–810, 1963.