

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

	<u>Sayfa No</u>
Nursultan KADYROV, Salih YAZICIOĞLU Soğuk Derzin Betonun Eğilme ve Doğrudan Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisinin Araştırılması Research of Cold Joint Effects on the Direct Tensile and Flexural Strength of the Concrete	203-210
Kemal ÜÇÜNCÜ Konutlarda Odun Esaslı Malzemelerin Havanın Bağlı Nemine Etkisi – Analitik İnceleme Effects of Wood-Based Materials on the Air Humidity in the Buildings - Analytical Review	211-221
Irmak Karaduman, Özlem Barin, Dilber Esra Yıldız, Selim Acar Atomik Tabaka Biriktirme Metodu ile Üretilen HfO ₂ Tabanlı Sensörlerin Hidrojen Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi Investigation of Hydrogen Gas Sensing Properties of HfO ₂ Based Sensor Produced By Atomic Layer Deposition Method	223-229
Süleyman TAŞGETİREN, Mehmet YALVAÇ, Özgür VERİM Mühendislik Bakış Açısıyla Cerrahi Robot Teknolojisinde Mevcut Durum Ve Beklentiler: Literatür Taraması State of the Art and Expectations in the Surgical Robotics Technology from the Engineering Point of View: A Literature Review	231-244
Harun SÜMBÜL, Yusuf YAKUT Yürüme Engelli Bireyler için Pedaldan Kumandalı Dikiş Makinelerinin Kumanda Bileklik Sistemi ile Kontrolü The Control of Treadle Sewing Machines with Wristbands Control System for Persons with Walking Disabled	245-249
Murat KARABACAK, Fuat KILIÇ, Bilal SARAÇOĞLU, Ali Fuat BOZ, Abdullah FERİKOĞLU Şebeke Bağlantılı Eviriciler için LLCL Filtre Tasarımı; Detaylı Bir Performans Analizi LLCL Filter Design for Grid Connected Inverters; a Detailed Performance Analysis	251-260
Alp KARADENİZ, Mehmet Kubilay EKER Rüzgar ve Termik Santrallerden Oluşan Enerji Sistemlerinde Ekonomik Güç Dağılımının Big-Bang Big-Crunch, PSO ve IMO Algoritmaları ile İrdelenmesi BB-BC, PSO and IMO Algorithms for Economic Dispatch Problem of Wind-Thermal Power Plants	261-268
İbrahim TANIR, Ösgün ÖZTÜRK, Emre DORUK Araç Gövdesi Mimari Kesitlerinin Parametrik Tasarımı Parametric Design of Vehicle Body Architectural Sections	269-274
Hakan ADA¹, Sinan AKSÖZ¹, Tayfun FİNDİK², Cemil ÇETİNKAYA², Mehmet GÜLSÜN¹ Tozaltı Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Petrol ve Doğalgaz Borularının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi Investigation of Microstructure and Mechanic Properties of Petroleum and Natural Gas Pipeline Weldment by Submerged Welding Processes	275-282
Nevin ÇANKAYA, Özlem SÖKMEN Kitosan-Kil Nanokompozitleri Chitosan-Clay Nanocomposites	283-295
Mehmet AYDIN Dik Kesme İşleminde Kalıcı Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi Finite Element Modeling of The Residual Stresses In Orthogonal Machining Process	297-304
Erol KURT, Cihan BİNGÖL A New Sweep Up/Down Phenomenon between the Chaotic and Regular Regions in a New R2L2D Circuit Yeni R2L2D Devresinde Kaotik ve Düzenli Bölgeler Arasında Yeni Bir Yukarı/Aşağı Geçiş Olgusu	305-310
Yusuf Tansel İÇ, Hikmet DURAN, Barış KEÇECİ, Emrecan İLİK, Berkan BİLGİÇ Çok Yanıtlı Taguchi Eniyilemesine Yönelik Bir Bilgisayar Uygulamasının Geliştirilmesi Development of a Computer Application for Multi-Response Taguchi Optimization	311-323
Doğan KÜÇÜK, Nursal ARICI Türkçe için Wikipedia Tabanlı Varlık İsmi Tanıma Sistemi Wikipedia-based Named Entity Recognition System for Turkish	325-332
Gözde VAREL, Ahmet GÜRAL Eş Kanallı Açısal Presleme ve Toz Metalurjisi Yöntemiyle İşlenmiş Elementel Tozlardan Yaşlandırılabilir Al-%4Cu Alaşımların Üretimi Üzerine Bir Çalışma A Study on Production of Age-Hardenable Al-%4Cu Alloys from Elemental Powders Processed by Equal Channel Angular Pressing and Powder Metallurgy Route	333-341
Ülkü SAYIN, Sami BÜYÜKÇELEBİ, Ayhan ÖZMEN Cholesteryl Octanoate Tek Kristalinde Işınlama ile Oluşan Radikalın ESR Tekniği Kullanılarak Belirlenmesi Determination of Radicals Produced by Irradiation in Cholesteryl Octanoate Single Crystals Using ESR Technique	343-348
Mustafa KARABATAK, Fuat KARA AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Sert Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel Optimizasyonu Experimental Optimization of Surface Roughness in Hard Turning of AISI D2 Cold Work Tool Steel	349-355
Mustafa İLBAŞ, Serhat KARYEYEN, Kazım ÇİLİNGİR Ön Karışimsız ve Ön Karışimli Metan Alevlerinin Baca Yanma Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi Experimental Investigation of Flue Gas Combustion Parameters of Non-Premixed and Premixed Methane Flames	357-365
Erdem ÇİFTÇİ, Adnan SÖZEN, Esra KARAMAN TiO ₂ İçeren Nanoakışkan Kullanımının Isı Borusu Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi Experimental Investigation of Nano fluid Usage Including TiO ₂ on The Effect of Heat Pipe Performance	367-376
Adnan ALDEMİR¹, Hale HAPOĞLU² Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol ile Kablosuz Sıcaklık Profillerinin Karşılaştırılması Comparison of Wireless Temperature Profiles With Generalized Predictive Control	377-387

POLİTEKNİK DERGİSİ

Journal of Polytechnic

POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CİLT 19 NUMBER / SAYI 3 SEPTEMBER / EYLÜL 2016

Politeknik Dergisi

Journal of Polytechnic

Sahibi / Owner
Prof. Dr. İbrahim USLAN
Rektör / Rector

Yayın Yönetmeni / Publishing Manager
Prof. Dr. H. Rıza BÖRKLÜ
Dekan / Dean

Editör / Editor
Prof. Dr. Adnan SÖZEN

YARDIMCI EDİTÖRLER/ASSOCIATE EDITORS

Prof. Dr. Ö. Faruk BAY, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Musa ATAR, Gazi Üniversitesi
Prof. Dr. Erol KURT, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. M. Tolga ÖZKAN, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Onuralp ULUER, Gazi Üniversitesi
Doç. Dr. Mustafa ÖZER, Gazi Üniversitesi

YAYIN DANIŞMA KURULU/EDITORIAL ADVISORY BOARD

Abdullah KURT, Gazi Üniversitesi	M.Baki KARAMIŞ, Erciyes Üniversitesi
Abid ABU-TAIR, Berzeit University	Mahmood GHORANNEUISS, Azad University
Adel NASİRİ, University of Wisconsin Milwaukee	Mehmet TÜRKER, Gazi Üniversitesi
Arcan DEREÇİOĞLU, Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Metin GÜRÜ, Gazi Üniversitesi
Arif WANI, California State University	Metin İPEK, Sakarya Üniversitesi
Ayhan ÖZÇİFÇİ, Karabük Üniversitesi	Murat HOSOZ, Kocaeli Üniversitesi
Ayşe MURATHAN, Gazi Üniversitesi	Mustafa AKTAŞ, Gazi Üniversitesi
Bekir Sami YILBAŞ, King Fahd University	Myung Hyun KİM , Kyung Hee University
Cevdet SÖĞÜTLÜ, Gazi Üniversitesi	Nadire Şule ATILGAN, Hacettepe Üniversitesi
Derviş KARABOĞA, Erciyes Üniversitesi	Nizamettin KAHRAMAN, Karabük Üniversitesi
Engin ÖZDEMİR, Kocaeli Üniversitesi	Nobumasa Matsui, Nagasaki University
Ercan ÖZGAN, Düzce Üniversitesi	Nusret AS, İstanbul Üniversitesi
Erol ARCAKLIOĞLU, TÜBİTAK	Osman ISIKAN, Marmara Üniversitesi
Farzollah MIRZAPOUR, University of Zanjan	Peter LUND, Helsinki University of Technology
Halil İbrahim BAKAN, TÜBİTAK, MAM	Ramazan BAYINDIR, Gazi Üniversitesi
Halit KARABULUT, Gazi Üniversitesi	Ramazan KURT, Bursa Teknik Üniversitesi
Hani H.W.SAIT, King Abdulaziz University	Ramazan YILMAZ, Sakarya Üniversitesi
Hanifi SARAÇ, Yıldız Teknik Üniversitesi	Recep ÇALIN, Kırıkkale Üniversitesi
Henryka Danuta STRYCZEWA, Politechnika Lubelska	Rodica MILICI, Stefan cel Mare Suceava University
Hüseyin AKILLI, Çukurova Üniversitesi	Saffa B. RIFFAT, Nottingham University
Hüseyin EKİZ, Süleyman Şah Üniversitesi	Saw Sor HEOH, INTI International University
Hüseyin Rıza BÖRKLÜ, Gazi Üniversitesi	Suat CANBAZOĞLU, İnönü Üniversitesi
İbrahim DİNÇER, University of Ontario, Institute of Technology	Süleyman GÜNDÜZ, Karabük Üniversitesi
İbrahim SEFA, Gazi Üniversitesi	Seyhan FIRAT, Gazi Üniversitesi
İhsan KORKUT, Gazi Üniversitesi	Sing LEE, Institute for Plasma Focus
İlhami ÇOLAK, Gazi Üniversitesi	Souad A.M.ALBATHI, International Islamic University of Malaysia
İlker USTA, Hacettepe Üniversitesi	Şükrü DURSUN, Selçuk Üniversitesi
İshak KARAKAYA, Orta Doğu Teknik Üniversitesi	Tayfun MENLİK, Gazi Üniversitesi
İsmail AYDIN, Karadeniz Teknik Üniversitesi	Turgay AKBULUT, İstanbul Üniversitesi
Jamal KHATIB, University of Wolverhampton	Ulvi ŞEKER, Gazi Üniversitesi
Jerzy Smardzewski, Ponzan University	Yakup İÇİNGÜR, Gazi Üniversitesi
John KINUTHIA , University of South Wales	

Cilt / volume : 19

Sayı / number : 3

Eylül / september : 2016

e - ISSN : 2147-9429

Politeknik Dergisi Gazi Üniversitesi tarafından yılda **dört sayı** olarak yayınlanmaktadır / Journal of Polytechnic has been Published **four issues** per year by Gazi University

BU SAYIYA (CİLT 19 SAYI 3) KATKI VEREN HAKEMLER

Abdullah KURT	Mustafa ACARER
Abdülmecit GÜLDAŞ	Mustafa AKTAŞ
Ahmet EKERİM	Mustafa AYDIN
Ali GENÇER	Mustafa GÜNAY
Arif GÖK	Mustafa İLBAŞ
Ayşe MURATHAN	Mustafa TAŞYÜREK
Diyar AKAY	Necmi ALTIN (3 Kez)
Gülşen ERYİĞİT	Özgür ÇAKIR
Halil ÜNAL	Ramazan BAYINDIR
Halit YAZICI	Ramazan YILMAZ
Hüdayim BAŞAK	Recai KILIÇ
H. Rıza BÖRKLÜ (2 Kez)	Recep ÇALIN
İbrahim ATILGAN	Serdar YÜCESU
İbrahim SEFA	Selim PUL
İhsan KORKUT	Serap AYDIN
Kurtuluş BORAN	Sezgin AYDIN (2 Kez)
Mehmet AKCAYOL	Süleyman KORKUT
Mehmet BAĞCI	Tayfun MENLİK
Metin ASLAN	Ulvi ŞEKER
Milan STORK	Zafer TEKİNER (2 Kez)
Muammer NALBANT	

Yazışma Adresi / Correspondence Address :

Politeknik Dergisi Editörlüğü
Gazi Üniversitesi
Teknoloji Fakültesi
Tanıtım ve Yayın Müdürlüğü
06500 Teknikokullar
ANKARA –TÜRKİYE

Tel : 0312-202 34 12

Fax : 0312-212 00 59

Elektronik Posta Adresi / e-mail : politeknik@gazi.edu.tr

Teknik Sorumlu / Technical Manager : **Serhat KARYEYEN**

Dizgi / Compositor : **İdris ÖZÇELİK**

Baskı / Printing : Gazi Üniversitesi Matbaası / Printing Unit of Gazi University

Soğuk Derzin Betonun Eğilme ve Doğrudan Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisinin Araştırılması

Nursultan KADYROV, Salih YAZICIOĞLU

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara-Türkiye

(Geliş / Received : 04.07.2015 ; Kabul / Accepted : 27.01.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, deneysel olarak soğuk derzin betonun eğilme ve doğrudan çekme dayanımı üzerine etkileri araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar TS EN 206-1 standardına göre üretilen C25 sınıfındaki beton numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir. 100x200 mm boyutlarında silindir ve 100x100x500 mm boyutlarında prizma şeklinde hazırlanan beton numunelerinde 45° ve 90° açılarda soğuk derz oluşturulmuştur. Numunelerin yarısı dökülüp 2, 3, 4 ve 6 saat bekletilerek soğuk derz oluşturulduktan sonra kalan yarısı dökülmek suretiyle deney numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler üzerinde eğilme ve doğrudan çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre soğuk derz oluşumunda süre uzadıkça eğilme ve doğrudan çekme dayanımlarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu azalmanın 6 saatten sonra dökülen betonlarda daha belirgin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton, soğuk derz, eğilme dayanımı, doğrudan çekme

Research of Cold Joint Effects on the Direct Tensile and Flexural Strength of the Concrete

ABSTRACT

This study researches the effects of cold joint on the direct tensile and flexural strength of the concrete. The experimental studies were carried out on C25 concrete samples produced according to the standard TS EN 206-1. Cold joints were formed at the angles of 45 and 90 degrees in the concrete samples, which were produced in the shape of a 100x200 mm cylinder and a 100x100x500 mm prism. Test samples were prepared first by pouring the half of the concrete samples and forming the cold joint after waiting 2, 3, 4 and 6 hours, and then by pouring the remaining half of the concrete. Direct tensile and flexural strength tests were conducted on these samples. The results showed that during the formation of cold joint, a longer period of time led to a decrease on the direct tensile and flexural strength of the concrete. This decrease was more evident on the concrete samples poured after 6 hours.

Keywords: Concrete, cold joint, flexural strength, direct tensile

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton; çimento, agrega, su ve uygun katkı maddelerinin hesaplar neticesinde belirlenen ve belirli bir üretim teknolojisine uygun olarak belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidrasyonu sebebiyle katılaşıp istenilen şekli alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir. Beton, uzun yıllardan beri en önemli yapı malzemesi olma özelliğini korumuştur. Güncelliğini kaybetmeyen beton, bütün yapılarda az veya çok kullanılmaktadır. Bu yapılar arasında; yollar, sulama kanalları, köprüler, barajlar ve konutlar sayılabilir. Betonun tercih edilme sebepleri; şekil verilebilme kolaylığı, fiziksel ve kimyasal dış etkilere karşı dayanıklılığı, ekonomik olması, kullanımını ve üretimindeki pratikliğidir [1].

Betonun döküm sırası betonun kalitesini önemli derecede etkiler. Taze betonun yerine yerleştirilmesi işleminin başarıyla sonuçlanabilmesi için, bu işleme başlamadan önce uygun bir planlama yapılması ve bazı ön hazırlık-

ların yerine getirilmesi gerekmektedir. Taze betonun yerleştirme işlemi başladığında, bu işlemin istenmeyen herhangi bir nedenle yarıda kalmaması gerekmektedir. Aksi takdirde, önceden yerleştirilmiş ve sertleşmiş olan betonun yüzeyi ile daha sonra yerleştirilen taze betonun yüzeyi arasında yeterli aderans oluşmamakta ve “soğuk derz” olarak ifade edilen istenmeyen bir bağlantı meydana gelmektedir [2].

En iyi beton dökümü, ek yapılmadan yani ara verilmeden dökülen betondur. Ancak elde olmayan sebeplerle beton döküm işlemine ara vermek ve daha sonra dökülen kısımlardan devam etmek zorunda kalınabilir. Örneğin; beton mikserinin gecikmesi, kalıpların patlaması veya döküm alanının büyük olması gibi nedenlerle beton döküm aralıkları uzayabilir veya işin ertesi güne sarkması ile beton dökme işi yarım kalabilir. Dökülen beton sertleşmeye başladıktan veya tamamen sertleştikten sonra, bırakılan kısımlarda yeniden beton dökme işlemine devam edilmesi ile ilk tabaka arasında soğuk derz adı verilen ek yerleri ve süreksizlikler meydana getirilmiş olur. Bu ek yerlerinin betonun bazı mekanik özelliklerini olumsuz etkilemesi söz konusudur [3].

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: nurik_kadirov@mail.ru

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 203-210

Soğuk derz, betonun safhalar halinde ara verilerek dökülmesi durumunda, iki dökümün birleşim yerinde oluşan birleşme yetersizliği olarak tanımlanabilir [4]. Ek yerleri genellikle yapıların zayıf kısımlarıdır. Bu kısımlarda beton elemanın çekme ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri, bütün olarak dökülmüş homojen bir beton elemana göre daha azdır [3]. Bu nedenle ek yapılacak beton tabakaları arasında kuvvetli bağlantının sağlanması gerekmektedir. Aslında yapıların hemen hepsinde, betonun bir seferde dökülüp bitirilememesinden dolayı soğuk derzler oluşturulmaktadır. Farklı zamanlarda dökülen kolon ve kiriş betonları, kat betonları veya yapının temeli ile üzerine gelecek taşıyıcı elemanların betonları arasında bu tür ek yerlerinin ve süresizliğin oluşacağı önceden bilinmektedir. Bu türden oluşabilecek ek yerlerini azaltmak için kolon ve kiriş betonlarının birlikte dökülmesi tercih edilmelidir. Ek yerleri momentin en az olduğu yerlerde oluşacak şekilde seçilmeli ve soğuk derzler yatay elemanlar için yaklaşık 45°, düşey elemanlar için ise yatay olacak şekilde, kademeli ya da dişli olarak bırakılmalıdır. Ayrıca bu kısımlarda donatı filizleri ve kaba agrega parçaları bırakılmalıdır [3].

Soğuk derzle ilgili Rathi ve Kolase [5], soğuk derzin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için, soğuk derz oluşumu ile ilgili sonuçlara bakarak priz geciktirici madde olarak şeker kullanmışlardır. Yazarlar; numunelerin hazırlanmasında ilk önce kalıbın yarısına 45° açıyla eğimli ve 90° açıyla dikey olarak beton dökmüşler, 45, 75, 120 ve 180 dakikadan sonra kalıbın kalan yarısına taze beton dökmüşlerdir. Hazırlanan numuneler üzerinde basınç, eğilme ve yarmada çekme deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak, priz geciktirici madde olarak şeker katılan betonların normal betonla karşılaştırıldığında, soğuk derz oluşumunu çok az miktarda engellediğini ortaya koymuşlardır [5].

Subba ve Kishen [6] soğuk derzin beton boyutuna göre etkisini araştırmışlardır. İlk önce farklı boyutlarda prizma kalıplar hazırlamışlar, daha sonra kalıpların yarısına tek seferde hazırlanan aynı karışım oranına sahip taze

beton dökmüşlerdir. İki günden sonra ise kalıpların kalan yarısını aynı karışım oranındaki taze betonla doldurarak numunelerini hazırlamışlardır. Sonra bu numuneler üzerinden eğilme dayanımı deneyi yapmışlardır. Çalışma sonucuna göre soğuk derz oluşan betonların arasında kesinlikle donatı yerleştirilmesi gerektiğini, numunenin boyutu arttıkça maksimum yük taşıma kapasitesinin de arttığını ve zaman geçince soğuk derz oluşan betonların eğilme dayanımının azaldığını tespit etmişlerdir[6].

Lion [7] tarafından yapılan soğuk derz çalışmasında kalıbın ilk yarısına taze beton döküldükten 72 saat sonra, kalıpların ikinci yarısı aynı karışım oranına sahip taze betonla doldurulmuştur. Boyutları 150x150x600 mm olan prizma numune üzerinde eğilme deneyi yapılmış ve karbonatlaşma deneyi için soğuk derz oluşan betonlardan boyutları 100x140 mm olan karot numuneler alınmıştır. Karbonatlaşmada kullanılan numuneler 4 hafta boyunca farklı sıcaklıklarda ve ortamlarda tutulmuştur. Soğuk derz numunelerinin karbonatlaşması normal betonun karbonatlaşması ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, prizma numunelerinin üzerinde yapılan eğilme deneyinde zaman arttıkça soğuk derz oluşan betonların eğilme dayanımının azaldığı, karbonatlaşma deneyinin sonuçlarına göre ise soğuk derzde oluşan karbonatlaşma miktarı normal betonun karbonatlaşma miktarına göre yüksek olduğu belirlenmiştir [7].

Bu çalışmada, beton dökümü sırasında ilk beton dökülüp prizini almaya başladıktan sonra ikinci betonun geç dökülmesi nedeni ile oluşan soğuk derzde iki beton arasındaki aderansın araştırılması ve soğuk derzin olumsuz etkilerini en az seviyede tutulması için, ikinci betonun en geç kaç saat içinde dökülebileceğinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHOD)

2.1 Malzeme (Material)

Beton numunelerinin hazırlanmasında karışım suyu olarak Ankara şehir içme suyu kullanılmıştır. Deneysel ça-

Çizelge 1.Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Chemical, physical and mechanical characteristics of the cement)

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO ₂ (%)	22.87	Priz Başlangıcı (dk)	163
Al ₂ O ₃ (%)	5.59	Priz Sonu (dk)	216
Fe ₂ O ₃ (%)	3.22	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.11
CaO (%)	58.82	Özgül Yüzey Alanı (cm ² /g)	3837
MgO (%)	2.35		
SO ₃ (%)	3.50		
Cl (%)	0.022		
Na ₂ O (%)	0.47		
K ₂ O (%)	1.05		
Kızdırma Kaybı (%)	2.11		
		Mekanik Özellikler	
		Basınç Dayanımı(MPa)	
		1.Gün	16.7
		2.Gün	28.4
		7.Gün	41.7
		28.Gün	54.2

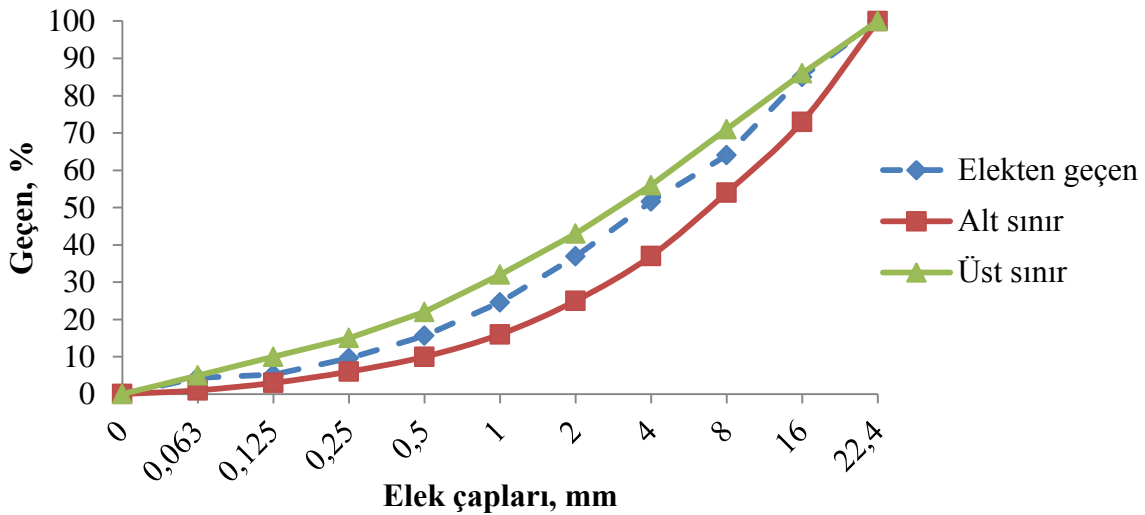
lışmada kullanılan çimento, agrega ve yapıştırıcı olarak kullanılan epoksinin özellikleri ise aşağıda verilmiştir.

2.1.1. Çimento (Cement)

Çalışmada kullanılan çimento CEM II 42.5 R tipi çimento olup, Baştaş Çimento Ankara Elmadağ üretim tesisinden getirilmiştir. Kullanılan çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve mekanik analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

2.1.2. Agrega (Aggregate)

Beton karışımında kullanılan agrega Ankara, Mamak bölgesindeki Uğural taş ocağından getirilmiştir. Kullanılan agreganın cinsi kalker taşıdır. Karışımında 0-4, 4-11.2 ve 11.2-22.4 mm elek aralıklarında agrega kullanılmıştır. Agreganın elek analizi grafiği Şekil 1'de verilmiştir. Karışımındaki agrega granülometrisi TS 706 EN 12620 [8] standardında belirtilen sınır değerler içerisinde kalmıştır.



Şekil 1. Agreganın tane büyüklüğü dağılımı (Particle size distribution of the aggregate).

2.1.3. Epoksi (Epoxy)

Çalışmada Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. tarafından üretilen Sikadur®-52 yüksek dayanımlı epoksi reçinelerden oluşan iki bileşenli, solventsiz, düşük viskoziteli enjeksiyon reçinesi kullanılmıştır. Kullanılan epoksinin üretici firmadan temin edilen kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

2.2 Yöntem (Method)

2.2.1. Deney örneklerinin hazırlanması (Preparation of test samples)

Çalışmada TS EN 206-1 standardına göre C25 sınıfında beton üretilmiştir [10]. Beton 40 dm³ kapasiteli düşey eksenli laboratuvar tipi beton karıştırıcısında 2 dakika boyunca karıştırılarak üretilmiştir. Hazırlanan betonun kıvamının belirlenmesi için TS EN 12350-2'ye göre çökme deneyi yapılmış ve kıvam sınıfı S2 olarak belirlenmiştir [11]. Hazırlanan betonun karışım oranları Çizelge 3'te verilmiştir. 100x200 mm boyutlarında hazırlanan silindir numunelerinin ortalama basınç dayanımı 38.6 MPa olarak belirlenmiştir. Betonların basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3'e uygun olarak yapılmıştır [12]. 100x200 mm boyutlarında silindir ve 100x100x500 mm boyutlarındaki prizma kalıplarda soğuk derz oluşturmak için ilk önce kalıpların yarısına 45° ve 90° açılarda soğuk derz oluşturulacak şekilde (Şekil

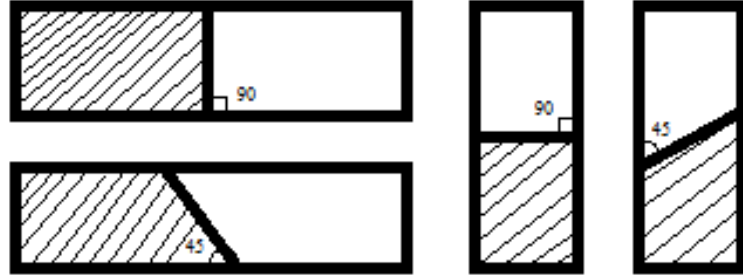
2) taze beton dökülmüştür. Betonun yüzey kısmı dışı olarak bırakılmıştır. Kalıp içerisine betonu 45° açıda dökmek için kalıp 45° açığa getirilmiş ve ilk beton dökümü yapılmıştır. İlk beton döküldükten sonra numuneler 2, 3, 4 ve 6 saat bekletilmiştir. Belirtilen süreden sonra aynı taze beton karışımı ile kalıpların kalan diğer yarısı doldurulmuştur. Numuneler 24 saat nemli or-

Çizelge 2. Epoksinin kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri (Chemical, physical and mechanical characteristics of epoxy)

Kimyasal Özellikler	
Yoğunluk:	A bileşeni: 1.13 kg/l (+20°C'de) B bileşeni: 1.01 kg/l (+20°C'de)
Viskozite:	450 cp (+20°C'de)
Termal Genleşme Katsayısı:	89x10 ⁻⁶ per °C (-20°C - +40 °C)
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	
Basınç Dayanımı:	53 N/mm ² (10 gün sonunda +20 °C)
Çekme Dayanımı:	25 N/mm ² (10 gün sonunda +20 °C)
Yapışma Dayanımı:	- Betonda: >4 N/mm ² (beton kırılması) (+23°C'de 7 gün sonunda) - Çeliğe: ~10 N/mm ² (DIN 53232)

Çizelge 3. 1 m³ beton için malzeme karışımı (Material mixture for 1 m³ of concrete)

Çimento (kg)	Su (kg)	S/Ç	Agrega (kg)		
			0-4	4-11.2	11.2-22.4
400	209	0.52	720	525	390



Prizma

Silindir

Şekil 2. Kalıpların yarısına 45° ve 90° açılarda soğuk derz oluşturacak şekilde beton dökülmesini gösteren şematik çizim (A schematic diagram illustrating how the concrete has been poured to create a cold joint into half of moulds of 45 and 90 degrees)

tamda bekletildikten sonra kalıplardan çıkartılarak 28 gün boyunca 20±2°C sıcaklıkta kür edilmiştir.

2.2.2. Epoksi hazırlanması (Preparation of epoxy)

Epoksiyi kullanım haline getirmek için, A ve B bileşenleri birbiriyle karıştırılmıştır. Karışım oranı A:B = 2:1 ağırlıkçadır. A:B = 2:1 oranda epoksi çok akıcı olduğu için karışıma C bileşeni eklenmiştir (C=A). C bileşeni 0.25 mm elekten geçen taş unudur. Bileşenler karıştırılıp macun kıvamına getirildikten sonra betona yapıştırılmıştır [9].

2.2.3. Doğrudan çekme dayanım deneyi (Direct tensile strength testing)

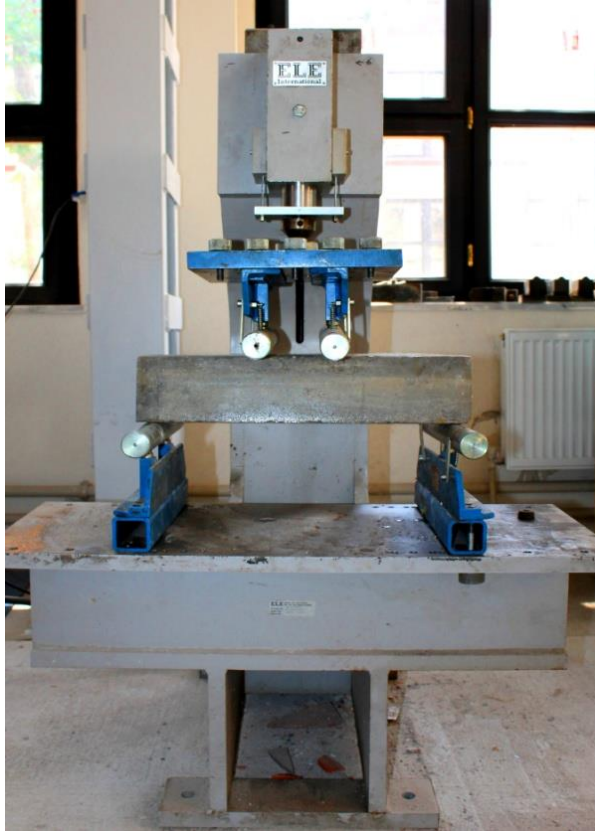
Doğrudan çekme dayanım deneyi TS 2027'ye uygun olarak sadece silindir numuneleri kullanılarak yapılmıştır [13]. 28 günden sonra numuneler 12 saat laboratuvar şartlarında bekletilmiştir. Sonra silindir numunelerinin iki yüzeyine kalınlığı 10 mm ve çapı 100 mm olan çelik bir eleman epoksi ile Şekil 3'de verildiği gibi yapıştırılmıştır. Yapıştırmadan önce silindirin yüzeylerindeki tozlar iyice temizlenmiştir.



Şekil 3. Çekme dayanımı deneyinde kullanılan a) beton numunelerin yüzeylerine yapıştırılan çelik başlık, b) doğrudan çekme deney makinası c) çelik başlık yapıştırılarak doğrudan çekme deneyine hazır hale getirilmiş bir beton numunesi (Used in the experiment of tensile strength a) a steel helmet adhered to the surfaces of concrete samples, b) a direct tensile test machine, c) a concrete sample made available for direct tensile testing by adhering steel helmet).

2.2.4. Eğilme dayanım deneyi (Tests of flexural strength)

28. günde sudan çıkarılan 100x100x500 mm prizma numunelerinin eğilme dayanım deneyi TS EN 12390-5 [14] standardına uygun olarak eğilmede çekme deney makinası kullanılarak yapılmıştır. Eğilme dayanım deneyinde standarda göre prizma numuneleri mesnetlere L/3 mesafesinde iki noktadan yüklenerek kırılmıştır. Prizma numunelerin yükleme deneyine ait bir görünüm Şekil 4'te verilmiştir.



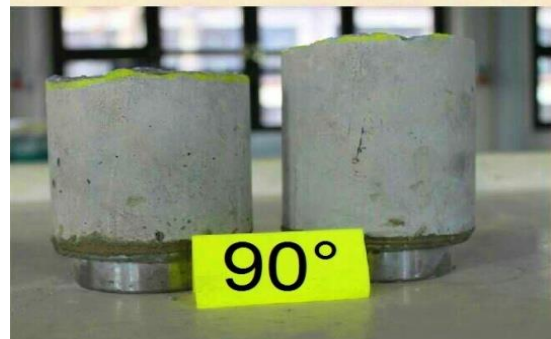
3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Doğrudan Çekme Dayanım Deneyi (Direct Tensile Strength Testing)

Doğrudan çekme deneyi sonucunda silindir numunelerin kopma yerleri Çizelge 4'te şematik olarak gösterilmiştir. Ayrıca 45° ve 90° açıda soğuk derz oluşturulan ve doğrudan çekme dayanımı deneyi yapılmış bir numuneye ait örnek bir görünüm Şekil 5'de verilmiştir.

Çizelge 4. Silindir numunelerin kopma yerlerini şematik olarak gösteren çizimler; çizimlerde düz kesintisiz çizgi soğuk derzi, kesikli çizgi ise numunenin koptuğu yeri göstermektedir (A schematic diagram sample illustrating the location of cylinder rupture, in the figure the straight solid line represents cold joints, while the dashed line indicates where the sample breaks).

Soğuk derz oluşma süresi, (Saat)	90° açılı soğuk derz			45° açılı soğuk derz		
	Num. 1	Num. 2	Num. 3	Num. 1	Num. 2	Num. 3
2						
3						
4						
6						



Şekil 5. Doğrudan çekme dayanımı deneyi yapılmış örnek bir görünüm (A view of the experimented samples for direct tensile strength)

Çizelge 4 incelendiğinde 90° ve 45° açılarda dökülen betonlar farklı yerlerden kopmuş anlaşılmaktadır. 90° açıda 2 saatten sonra dökülen beton numunelerinin sadece 2 tanesi, soğuk derz oluşan yerden kopmamıştır. 3, 4 ve 6 saatlerden sonra dökülen beton numunelerinin hepsi soğuk derz oluşan yerlerden kopmuştur. 45° açıda ise 2 saatten sonra dökülen betonlar soğuk derz oluşan yerlerden kopmamıştır. 3 ve 4 saatten sonra dökülen betonlar soğuk derzin en zayıf noktasından kopmuş, 6 saatten sonra dökülen betonların tamamı ise soğuk derz oluşan yerlerden kopmuştur.

Çalışmada hazırlanan soğuk derz numunelerinin doğrudan çekme dayanım değerleri Çizelge 5’de verilmiştir. Ayrıca ortalama doğrudan çekme dayanım değerlerine ait grafik Şekil 6’da sunulmuştur.

Çizelge 5 incelendiğinde, 45° açıyla oluşturulan soğuk derzli betonların 90° açıyla oluşturulan soğuk derzli be-

oluşturulan betonlar arasındaki süre uzadıkça bu betonlar arasındaki aderansın da azaldığı belirlenmiştir.

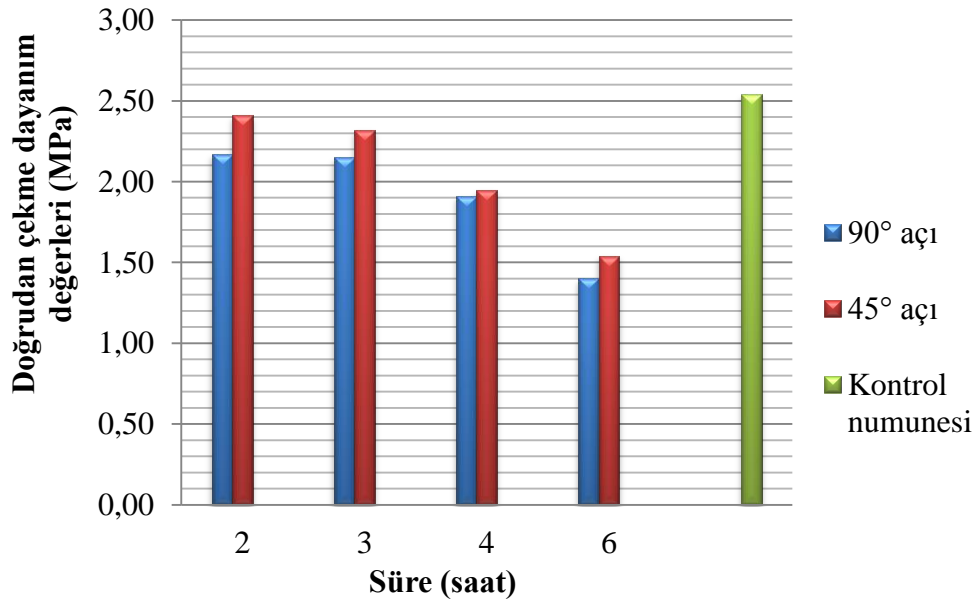
Çizelge 5’e göre 2 saatten sonra 45° açıyla dökülen beton sonuçlarının, soğuk derz oluşturulmadan dökülen kontrol betonun sonuçlarına en yakın olduğu görülmektedir. 90° açıyla oluşturulan soğuk derzli betonların doğrudan çekme dayanımı kontrol betonu doğrudan çekme dayanımından 2, 3, 4 ve 6 saatten sonra sırasıyla %14, %15, %25 ve %45 oranında azalmıştır. 45° açıyla oluşturulan soğuk derzli betonların doğrudan çekme dayanımı ise kontrol betonu doğrudan çekme dayanımından 2, 3, 4 ve 6 saatten sonra sırasıyla %5, %9, %23 ve %39 oranında azalmıştır.

3.2. Eğilme Dayanım Deneyi (Tests of Flexural Strength)

Eğilme dayanımı deneyleri sonucunda numunelerin kırılma yerleri şematik olarak Çizelge 6’da verilmiştir.

Çizelge 5. Doğrudan çekme dayanım değerleri (Values of direct tensile strength).

Soğuk derz oluşma süresi, (Saat)	Numunelerin doğrudan çekme dayanımı (MPa)								Kontrol numunesi, (MPa)
	90° açılı soğuk derz			Ortalama değer, (MPa)	45° açılı soğuk derz			Ortalama değer, (MPa)	
	Num.1	Num.2	Num.3		Num.1	Num.2	Num.3		
2	2.11	2.22	2.16	2.17	2.38	2.44	2.4	2.41	2.54
3	2.14	2.12	2.17	2.15	1.94	2.54	2.47	2.32	
4	1.89	1.97	1.85	1.91	1.97	1.99	1.88	1.95	
6	1.51	1.45	1.23	1.4	1.54	1.68	1.38	1.54	



Şekil 6. Ortalama doğrudan çekme dayanım değerleri (Average values of direct tensile strength)

tonlara göre daha yüksek çekme dayanımı değerleri verdiği görülmüştür. 45° açılı soğuk derzli betonların yapışma yüzeyinin 90° açılı soğuk derzli betonların yapışma yüzeyine göre daha büyük olması doğrudan çekme dayanımı değerlerini arttırmıştır. Elde edilen sonuçlar kaynak [6] ile benzerlik göstermektedir. Soğuk derz

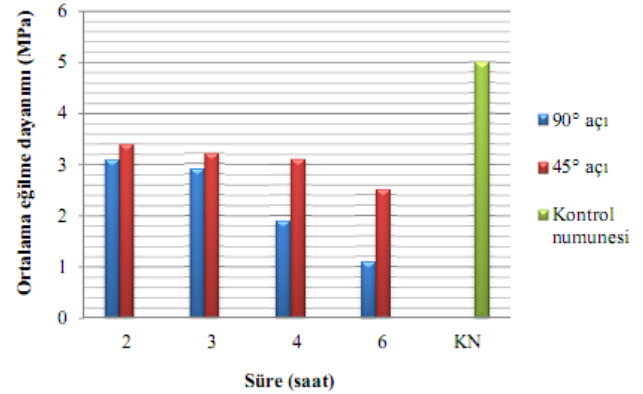
Çizelge 6. Prizma numunelerin kırılma yerlerini şematik olarak gösteren çizimler; çizimlerde düz kesintisiz çizgi soğuk derzi, kesikli çizgi ise numunenin kırıldığı yeri göstermektedir (A schematic diagram illustrating the location of the refractive prism samples; in this figure the straight solid line exemplifies cold joints, and the dashed line shows where the sample breaks).

Soğuk derz oluşma süresi, (saat)	Numune №	90° açılı soğuk derz		45° açılı soğuk derz		
		1	2	1	2	3
2	1	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
	2	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
	3	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
3	1	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
	2	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
	3	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
4	1	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
	2	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
	3	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
6	1	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
	2	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]
	3	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]	[Diagram]

Çizelge 6 incelendiğinde 45° açıda oluşturulan soğuk derzli betonların farklı yerlerden kırıldığı görülmektedir. 90° açılı oluşturulan soğuk derzli prizma numunelerin tamamı soğuk derz oluşan yerlerden kırılmıştır. Bu beklenen bir durumdur. 45° açılı oluşturulan soğuk derzli betonlar ise 90° açılı oluşturulan soğuk derzli betonlara göre farklılık göstermiştir. 45° açılı 2 ve 3 saatten sonra dökülerek oluşturulan soğuk derzli numuneler soğuk derzin en zayıf noktasından kırılmıştır. 4 saatten

sonra dökülen beton numunelerinin ikisi soğuk derz oluşan yerlerden diğeri ise en zayıf noktadan kırılmıştır. 6 saatten sonra dökülen betonların tamamı ise soğuk derzlerden kırıldığı görülmüştür.

Eğilme dayanım deneyi sonucunda elde edilen veriler Çizelge 7’de, ortalama eğilme dayanımı değerlerine ait grafik ise Şekil 7’de sunulmuştur.



Şekil 7. Ortalama eğilme dayanım değerleri (Average values of flexural strength).

Çizelge 7 incelendiğinde eğilme dayanım değerleri doğrudan çekme dayanım değerleri ile benzer sonuçlar vermiştir. 45° açıda dökülen betonlar 90° açıda dökülen betonlara göre daha büyük eğilme dayanım değerleri verdiği görülmüştür. Bu durum 45° açılı soğuk derzli betonların yapışma yüzeyinin daha büyük olmasıyla açıklanabilir. Çalışma ile elde edilen sonuçlar kaynak [6, 7] ile benzer özellik göstermektedir. Soğuk derz oluşturulan ikinci betonun geç dökülmesi ile iki beton arasında daha az aderans oluşmuştur. Ortalama eğilme dayanım değerlerine göre 45° açılı oluşturulan soğuk derzli betonların sonuçları bir birine yakındır. 90° açılı oluşturulan soğuk derzli betonların ise 2 ve 3 saatten sonraki eğilme dayanım değerleri birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Elde edilen sonuçlara göre 90° açılı oluşturulan soğuk derzli betonun eğilme dayanımı kontrol betonun dayanımından 2, 3, 4 ve 6 saatten sonra sırasıyla %38, %42, %62 ve %78 daha az olduğu görülmektedir. 45° açılı oluşturulan soğuk derzli betonun eğilme dayanımı ise kontrol betonun dayanımından 2, 3, 4 ve 6 saatten sonra sırasıyla %32, %36, %38 ve %50 daha az olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 7. Eğilme dayanım değerleri (Values of flexural strength).

Soğuk derz oluşma süresi, (Saat)	Numunelerin eğilme dayanımı (MPa)								
	90° açılı soğuk derz			Ortalama değer, (MPa)	45° açılı soğuk derz			Ortalama değer, (MPa)	Kontrol numunesi, (MPa)
	Num.1	Num.2	Num.3		Num.1	Num.2	Num.3		
2	3.1	3.4	2.6	3.1	3.3	3.4	3.5	3.4	5.0
3	3.1	2.6	2.8	2.9	3.3	3.0	3.2	3.2	
4	2.0	1.9	1.7	1.9	2.9	3.1	3.3	3.1	
6	1.2	1.0	1.1	1.1	2.1	2.9	2.5	2.5	

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Doğrudan çekme ve eğilme dayanım deneylerinde 45° açıyla oluşturulan soğuk derzli betonlar 90° açıyla oluşturulan soğuk derzli betonlara göre daha yüksek dayanım değerleri vermiştir.
- Soğuk derz oluşumunda sürenin artmasıyla betonun doğrudan çekme ve eğilme dayanımları azalmıştır.
- İlk dökülen betonun sonradan dökülen betonla temas alanı ne kadar genişse, iki beton arasında o kadar daha iyi aderans sağlandığı belirlenmiştir.
- 90° açıyla oluşturulan soğuk derzli betonun doğrudan çekme dayanımı kontrol betonun dayanımından 2, 3, 4 ve 6 saatten sonra sırasıyla %14, %15, %25 ve %45 daha düşüktür. 45° açıyla oluşturulan soğuk derzli betonun doğrudan çekme dayanımı ise 2, 3, 4 ve 6 saatten sonra sırasıyla %5, %9, %23 ve %39 oranında kontrol betonun dayanımından daha düşüktür.
- Doğrudan çekme dayanım deneylerinde 2 ve 3 saatten sonra dökülen betonlarda meydana gelen kopmalar en zayıf noktalardan, 4 ve 6 saatten sonra dökülen betonlarda ise soğuk derz oluşturulan yerlerinde meydana gelmiştir.
- Eğilme dayanım deneylerinde 90° açıyla oluşturulan soğuk derzli numunelerin tamamında meydana gelen kırılmalar soğuk derzlerde oluşmuştur. 45° açıyla oluşturulan soğuk derzli numunelerde ise 4 ve 6 saatten sonra dökülen numunelerde soğuk derzlerde kırılmalar meydana gelmiştir.
- Elde edilen bu sonuçlara göre beton döküm sırasında gecikmeler olduğu takdirde soğuk derzin olumsuz etkilerini en aza indirmek için alttaki beton tabakası 45° açıda bırakılmalı ve ikinci tabaka en geç 3 saate kadar dökülmelidir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Şimşek O., "Beton ve Beton Teknolojisi", Dördüncü Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2012.
2. Erdoğan T., "Beton", Dördüncü Baskı, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 2013.
3. Tuğrul B., "Soğuk Derz", *TMMOB İzmir Haber Bülteni*, 151: 41-42, (2010).
4. Shilstone J., "Surface Blemishes in Formed Concrete", *Symposium on Performance Evaluation of External Vertical Surface of Building, Technical Research Centre of Finland*, 3-7, (1977).
5. Rathi V. R., and Kolase P.K., "Effect of Cold Joint on Strength Of Concrete", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(9): (September, 2013).
6. Subba R. P., and Chandra Kishen J.M., "Interfacial fracture parameters and size effect in concrete-concrete cold joints", *Indian Institute of Science*, Bangalore 560 012, India.
7. Lion C., "Surface treatment agent for horizontal construction joint", *Technical Information(version 2)*, Joint ACE JA-40, Tokyo.
8. TS 706 EN 12620, "Beton Agregaları", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
9. Sikadur®-52, Ürün Bilgi Föyü, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş., İstanbul, 2006.
10. TS EN 206-1, "Beton-Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
11. TS EN 12350-2, "Beton-Taze Beton Deneyleri-Bölüm 2: Çökme (slamp) Deneyi", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
12. TS EN 12390-3, "Beton-sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2003.
13. TS 2027, "Kayaçların Çekme Dayanımlarının Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1975.
14. TS EN 12390-5, "Sertleşmiş Beton Deneyleri – Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.

Konutlarda Odun Esaslı Malzemelerin Havanın Bağlı Nemine Etkisi – Analitik İnceleme

Kemal ÜÇÜNCÜ

Karadeniz Teknik Üniversitesi Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, 61080 Trabzon

(Geliş / Received : 25.06.2015 ; Kabul / Accepted : 04.02.2016)

ÖZ

Bu makale, ısıtılan kapalı mekanlarda hava ve higroskopik esaslı odun malzemeler arasındaki nem transferine ilişkin bulguları sunmaktadır. Isıtılan bina içi koşullarda hava nemi insanların yaşam konforu, algılanan hava kalitesi ve insan sağlığı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Bu nedenle, bina içi iklim koşullarında uygun higroskopik odun esaslı malzemelerin uygulanması ile insanların yaşam kalitesi iyileştirilebilir. Bu çalışmada, Karadeniz Teknik Üniversitesi (Trabzon/Türkiye) lojmanlarında, içerisinde odun kökenli malzemelerin bulunduğu ısıtılan bir dairenin salonunda nem transferi ve havanın bağlı nemi sayısal olarak incelenmiştir. Teorik hesaplamalarda ideal gaz ve sorpsiyon bağıntıları, istatistik analizlerde SPSS-22 istatistik programı kullanılmıştır. Sonuçlar, bina içi iklim koşullarında hava ve higroskopik odun esaslı malzemeler arasındaki nem transferinin genellikle bağlı nemi dengeleyici etki yaptığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Nemli hava, Nem transferi, Kapalı ortam, Odun esaslı malzemeler.

Effects of Wood-Based Materials on the Air Humidity in the Buildings - Analytical Review

ABSTRACT

This paper presented the findings related to moisture transfer between indoor air and hygroscopic wood-based material in heated closed buildings. Humidity conditions inside the heated buildings have a significant impact on the people's living comfort, the perceived air quality and human health. Therefore, people's life quality may be improved with the implementation of appropriate hygroscopic wood-based materials which are suitable for indoor usage. In this study, moisture transfer of wood-based materials and relative humidity in the heated saloon of an apartment located at Karadeniz Technical University Housing (Trabzon / Turkey) were investigated numerically. In the theoretical calculations were used ideal gas and sorption equations. SPSS-22 statistical software were used for statistical analysis. The results showed that under the indoor climate conditions, the moisture transfer between the air and the hygroscopic wood-based materials usually provided balancing effect on the relative humidity.

Key words: Humid air, Moisture transfer, Indoor conditions, Wood-based materials.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hava, gerek iş yapan akışkan ve gerekse canlılara veya kullanılan malzemelere etkileri nedeniyle nem içeriği yönünden incelenmesi gereken bir akışkandır.

Hava nemi özgül nem, mutlak nem ve bağlı nem kavramları ile ifade edilmektedir [1]. Özgül nem [g/kg], birim ağırlıktaki havada bulunan su buharı ağırlığıdır. Mutlak nem [g/m³], birim hacim havada bulunan su buharı ağırlığıdır. Bağlı nem [%], havadaki nemin, aynı sıcaklıkta havanın taşıyabileceği maksimum neme oranıdır. Bir başka ifade ile bağlı nem, havadaki su buharının kısmi basıncının aynı sıcaklıktaki doymuş havanın kısmi basıncına oranıdır [2].

Bina içerisinde temiz ve ılıman bir havanın sağlık, konfor ve üretkenliği etkileyebileceğini ifade eden pek çok araştırma mevcuttur [3-7]. Bina içi koşullara yönelik projelerde genellikle sıcaklık analiz edilir, nem ölçümü ve hesabı ihmal edilir. Bununla birlikte, bina içi koşul-

larda oluşan nem aşağıda ifade edilen önemli etkilere sahiptir:

- Isıl konfor [8],
- İç hava kalitesi ve algısı [9],
- İnsan sağlığı ve yaşam kalitesi [10],
- Malzemelerin dayanımı [11-13],
- Malzeme emisyonları [14],
- Enerji tüketimi [15].

Ahşap malzeme, higroskopik özelliği nedeniyle içerisinde su alarak veya içerisindeki rutubetin bir kısmını havaya vererek belirli bir sıcaklık ve nem değerinde denge rutubetine ulaşır. Böylece, nem değişimi oranında rutubet alışverişi artarak önemli boyut değişimi sorunları ortaya çıkar [16]. Aşırı nemli ortamlarda ahşap malzemelerde küflenme, mantar üremesi ve çürüme gibi zararlar meydana gelir. Higroskopik özellikteki odun, bulunduğu ortam havasının nemi üzerinde etkilidir. Bu özelliği ile odun, kullanım yerindeki havanın nemini dengeleyici etki yapar [3, 17].

Korozyon, metallerin içinde buldukları ortamla reaksiyona girmeleri sonucu, dışarıdan enerji vermeye gerek

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: kucuncu@ktu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 211-221

olmadan, doğal olarak meydana gelen tepkimedir. Metallerin üst yüzeyleri rutubetli ortamlarda ve açık havada bir oksit tabakası ile kaplanır. Bu durum metal eşyaların işlevlerinin ve değerlerinin düşmesine yol açar [11, 12].

Gıdaların çürümesi, küflenme, mantar üremesi, toz gıdaların topaklanması, gıdaların üzerinin kabuk bağlaması ve renk değiştirmesi gibi benzeri günlük problemler sıcaklık değişikliğinin yanında özellikle nem değişikliğinden kaynaklanan olgulardır.

Ortamda nem değişimi, solunum etkinliğinin azalmasına, cildin ıslanmasına, boğazlarda tahrişe neden olarak insanların yaşam kalitesini düşürmektedir. Yüksek miktardaki nem, eşyalar üzerinde tahrip edici etkiye sahipken, insan sağlığı ve canlı yaşamında da olumsuz etkilere neden olur. Yüksek nemli ortamlarda yaşamak zorunda kalan insanlarda nefes alma zorluğu, astım, üst solunum yolları enfeksiyonları, romatizma-eklem hastalıkları ve kalp-damar rahatsızlıkları adeta kaçınılmaz olmaktadır. İnsan sağlığı, metal korozyonu, higroskopik tahribat, mantar – küf ve bakteri üremesinin önlenmesi açısından yüksek nem ile mücadele zorunludur [18]. Nemin ve mevsimselliğin grip virüsü üzerindeki etkileri incelenen bir çalışmada laboratuvar denemeleri önerilmiştir [19] Laboratuvar deneyleri, nemin grip virüsünün havada hayatta kalma ve iletimi üzerinde etkili olduğunu göstermiştir [20].

İnsanların konfor beklentileri değiştikçe ve havalandırma sistemleri geliştikçe ortam havasının nemi önem kazanmış, iç hava kalitesi kriterleri arasına nem kontrolü de girmiştir. İç hava kalitesini bozan sebeplerin büyük çoğunluğu iç kaynaklıdır. İç mekanda insan teri, parfümler, mutfak duman ve buharları, banyo ve çamaşırlardan yayılan buhar, endüstriyel ortamlardaki ürünlere bağlı nem çıkışları, vb. etkenler iç hava neminin sürekli artışına yol açar. İç mekanda istenilen sıcaklık derecesi sağlanmış olsa da yüksek nem insanları rahatsız edebileceği gibi, insanların kullandıkları malzemelerin niteliklerinin bozulmasına da yol açar.

Nem oranının yüksek olması, insan vücudunda terlemeyi önlemektedir. Kuru havada sıcaklık oranı yüksek olsa da rahatsızlık duyulmamaktadır. Ama nem oranı belli bir sınırı aştığında, kişi terleyemediği için ısı birikiminden dolayı rahatsızlık verici bir ortam oluşmaktadır. Nem oranı yüksek, merkezi sistem ısıtmalı, duvardan duvara halı kaplı, yeterli havalandırmanın sağlanmadığı evlerde eklem romatizması, yorgunluk ve astım hastalığı etkili olmaktadır [21].

İnsanın hem fiziksel, hem psikolojik olarak kendini rahat ve sağlıklı hissetmesi için havalandırma değerleri ve taze hava oranları dikkatli seçilmeli ve mahallerde iyi bir hava dağılımı sağlanmalı; hava sıcaklığı ve nem oranı, konfor şartları sınırları içinde tutulmalıdır [22].

Üretim için kullanılan kaynaklardan biri insan gücüdür. Isıl konfor donanımları eksikliği veya yetersizliği nedeniyle konfor bölgelerinden uzak iç hacim koşulları, insanın bedensel ve zihinsel performansını olumsuz etkilemekte ve böylece işgücünün verimsiz olarak kullanıl-

masına ve üretim maliyetinin artmasına neden olmaktadır [6, 23].

İnsanın yaşam koşullarının zorlaşması, insanların kullandığı malzemelerin ve gıdaların niteliklerinin bozulması gibi mal, para ve zaman kaybedilmesine sebep olan bu sorunlar özellikle yüksek nemden kaynaklanır. İklim ve hava koşullarına göre insan kontrolü dışında değişen nem, insan sağlığını ve eşya konforunu bozan en önemli etkidir. Sıcaklık ve nem iç hava kalitesi algısı üzerinde güçlü ve önemli bir etkiye sahiptir [9].

İnsanların yaşam kalitesi üzerinde buldukları ortam hava kalitesinin önemli etkileri vardır. Hava kalitesi ile hava içerisinde bulunabilecek karbondioksit (CO₂), solunabilir partikül maddeler, havada bulunan bakterilerin miktarı anlaşılrsa da havanın nemi de gerek doğrudan ve gerekse dolaylı olarak yaşam kalitesi için önemli bir faktördür. Kapalı mekamlarda hava bağıl nemi genellikle kış aylarında düşük (% 30-40), yaz aylarında yüksek (%50-60) değerler alır [24, 25]. Bakteri ve virüsler gibi organizmaların hayatta kalma ve enfeksiyon yapma etkileri %40-70 arasındaki bağıl nem değerlerinde minimize olmaktadır. Mantarların çoğu türü %60 bağıl nemin altında büyüyemez. Kapalı ortamlarda bağıl nemin olumsuz etkileri %40-60 arasında minimize olmaktadır [10].

Hohota vd. (2003), iç hava neminin sayısal tahmini ve kapalı mekandaki etkileri üzerine yaptıkları çalışmada elde ettikleri sonuçların kapalı mekanda ısı konforu garanti etmek için literatürde önerilen %30-60'lık nem düzeyleri ile kıyaslanabileceğini göstermişlerdir [26].

Andersen ve Korsgaard (1986), iç hava neminin sağlık üzerine etkilerine yönelik çalışmada %45'in üzerindeki bağıl neme sahip ortamda bakterilerin yaşama şansının ve astım vakalarının arttığını, astım vakalarının yaklaşık %60'ının yüksek iç nemden kaynaklandığını göstermiştir. Bu nedenle, önleyici tedbirler olarak hava değişim oranının artırılmasını ve bağıl nemin düşük derecelerde tutulmasını önermiştir [27].

Wolkof, P. ve Kiaergaard (2007), havanın serin ve kuru olması mekan hava kalitesi açısından yararlı olabileceğini, ancak bir iş günü boyunca gözlerde ve üst solunum yollarında tahriş semptomları gelişimi hakkında dikkatli düşünülmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Çalışmalar yaklaşık % 40 bağıl nemin gözler için, % 30'un altında bağıl nemin ise üst solunum yollarında daha iyi olduğunu göstermektedir [28].

Isıtılan bina içerisinde havanın bağıl nemi üzerinde iç hava sıcaklığı, dış hava sıcaklığı ve bağıl nemi, hava değişim oranı ve iç ortamdaki nem üretim kaynakları etkilidir. Bina içerisinde en önemli nem kaynakları genel olarak banyo, mutfak, içeride kurutulan çamaşırlar, süs bitkileri, insanların solunması ve terlemesi, higroskopik madde olarak odunda meydana gelen rutubet alışverişidir.

Konut iç sıcaklıkları, konutun bulunduğu iklim koşullarına, yapı – çevre ilişkilerine ve yapının özelliklerine göre projelendirilir [29].

Higroskopik özellikteki odunun rutubeti, bulunduğu ortam havasının sıcaklığına ve bağıl nemine bağlı olarak belirli bir dengeye ulaşır. Odunun bulunduğu ortamın sıcaklık ve bağıl nemi belirlenmişse, ulaşacağı denge rutubeti miktarı odun denge rutubetini veren tablo veya grafikler aracılığı ile belirlenebilir [30, 31].

Bağıl nemin iki yolla belirlenmesi mümkündür; ölçüm yapma veya analitik yolla hesaplama. Bağıl nemin ölçümü pratik ve ekonomik olmayacağı gibi, yeni tasarımlarda bağıl nemin belirlenmesinde en uygun ve pratik yol, bağıl nemi analitik yolla hesaplamaktır. Bina içi bağıl nemi, bina içi sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı ve bağıl nemi, yerleşik insan sayısı ile bina içinde bulunan higroskopik malzeme miktarı ve rutubetine göre değişir [32].

Odun denge rutubeti üzerinde dış kurutma faktörleri olarak nitelendirilen hava sıcaklığı, bağıl nemi ve hızının etkileri sözkonusudur [33]. Hava sıcaklığı mevsimlere ve coğrafik yörelere göre değişir. Isıtılan mahallerde sıcaklık kış aylarında sabit ve 20 °C'de tutulmakla birlikte, yaz aylarında dış ortam sıcaklığı seviyesinde seyrederek. Hava hızı dış koşullarda bina içi koşullara oranla daha yüksektir. Bu nedenle, dış koşullarda hava hızının ısı transferi üzerindeki olumlu etkisi nedeniyle odun denge rutubetinin iklim koşullarına uyumu daha hızlı gerçekleşir.

Havanın bağıl nemi insanın yaşam kalitesini etkileyen önemli bir ortam faktörüdür. Odun esaslı malzemeler higroskopik özellikleri nedeniyle hava ile sürekli nem alışverişinde bulunarak dengeye ulaşırlar. Isıtılan kapalı mekanlarda havanın bağıl nemi sıcaklığın ve ortamda bulunan odun esaslı malzemelerin etkisine bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu nedenle sıcaklık etkisinin yanında, odun esaslı malzemelerin de hava nemi üzerindeki etkilerinin belirlenmesi önem taşıyan bir araştırma konusudur.

Bu çalışmada, Karadeniz Teknik Üniversitesi Lojmanlarında (Trabzon /Türkiye) merkezi sistemle ısıtılan bir bina içindeki bağıl nem değerleri bina içi ortam sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı ve bağıl nemi ile hava değişim oranı ve bina içinde bulunan higroskopik malzeme miktarı ve rutubetinin fonksiyonu olarak belirlenmiştir. Deney odası kış döneminde düzenli olarak ısıtılmakta, ölçüm amacı dışında deney odasına insan girmemektedir.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Bu çalışmada, Karadeniz Teknik Üniversitesi (Trabzon/Türkiye) yerleşkesindeki lojmanlarında merkezi ısıtmalı ve doğal yolla havalandırılan bir binanın salonu deney odası olarak kullanılmıştır. Deney odası olarak incelenen salonun uzunluğu 8.30 m, genişliği 3.90 m uzunluğu için 4.15 m ve 4.40 m uzunluğu için 4.72 m, yüksekliği 2.60 m'dir. Brüt hacim 95 m³, net hacim 80 m³'tür. Kuzeye bakan tek duvarda biri 1.10 m x 2.90 m ve diğeri 1.10 m x 2.20 m olmak üzere iki adet ahşap

pencere ile aynı duvarda 0.60 m x 2.00 m ahşap balkon kapısı bulunmaktadır. Pencerelede 3 adet 0.60 m x 1.00 m açılır kanat mevcuttur. Salonun, hole açılan 0.85 m x 2.00 m boyutlarında ve aralıklı bir iç kapısı ve batı duvarında 0.75 m x 2.00 m çelik yangın merdiveni kapısı vardır.

Araştırmada, deney odası iç kapısı ile bitişik bölmeler arasında hava hareketinin olmadığı varsayılmıştır. İç duvarlar saten alçı boya, tavan badana boya, döşeme ahşap masif parke ve dışa bakan iki tuğla duvar yüzeyi dekoratif dış cephe sıvası uygulanmıştır.

Mimari projesinde bina normal bölge, çok serbest ve ayırık nizam şeklindedir. Bina 1993 yılında yapılmıştır. Bu nedenle, mevcut binada, yeni binalardaki gibi kuruma nedeniyle ortama fazla miktarda su buharı salınmaz. Benzer şekilde, pencerelerin aşırı sızdırmaz olmaması ve duvarların hava geçirmez şekilde tasarlanmaması nedeniyle duvarlarda terleme sözkonusu olmamaktadır.

Deney odası olarak incelenen salon içerisinde 2 cm kalınlıkta doğu kayını parke döşeme mevcuttur. Salon standart mobilya donanımları ile tefriş edilmiştir.

Trabzon için ısıtma dönemi Ekim – Nisan ayları arasındadır. Havalandırma genel olarak enfiltrasyonla, zaman zaman açılır pencere kanatlarının ve balkon kapısının varsayımlara uygun ölçüde açılması ile sağlanmaktadır.

Deney odası sıcaklığı ve bağıl nemi değerleri ile dış ortam sıcaklığı ve bağıl nemi değerleri bir yıl boyunca termohigrografla ölçülüp kaydedilmiştir.

2.2. Metot (Method)

Dış sıcaklık ve bağıl nem günlük ortalamaları, Meteoroloji rasat sonuçları ile uyum sağlamak üzere günün 7, 14 ve 21 saatlerindeki değerleri kullanılarak aşağıdaki denklemle hesaplanmıştır [34].

$$y = \frac{y7+y14+2 \times y21}{4} \quad (1)$$

Burada y, sıcaklık veya bağıl nem değerini ifade etmektedir.

Nemli hava içerisinde bulunan su buharının miktarı buharlaşma ve yoğunlaşma dolayısıyla değişir. Havanın ağırlığı her zaman sabit kalır. Nemli hava içerisindeki nem miktarının kuru hava miktarına oranı özgül nem olarak tanımlanır [35, 36].

$$x = \frac{m_b}{m_h} \text{ [g sb/kg h]} \quad (2)$$

Özgül nem 0 – ∞ arasında değerler alabilmesine rağmen 1 kg kuru havanın karışım teşkil edebileceği su buharı miktarı sınırlıdır. Genel olarak pratikte özgül nem değeri 0 < x < 0.2 arasında değişir. Bu koşullarda gaz karışımlarına uygulanan kanunlar nemli hava için de kullanılabilir. Bu durumda kuru hava ve su buharının karışımından oluşan nemli hava için aşağıdaki ideal gaz denklemleri yazılabilir.

Su buharı için

$$P_b V = m_b R_b T \quad (3)$$

Kuru hava için

$$P_h V = m_h R_h T \quad (4)$$

Basınç ilişkisi için

$$P = P_h + P_b \quad (5)$$

Verilen denklemler aracılığı ile özgül nem aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$x = 0.622 \frac{P_b}{P - P_b} \quad (6)$$

Hava – su buharı karışımı içerisinde su buharının kısmi basıncı (P_b), karışımın sıcaklığına karşılık gelen doyma basıncının (P_{bd}) üzerine çıkamaz. Doyma halindeki özgül nem

$$x_d = 0.622 \frac{P_{bd}}{P - P_{bd}} \quad (7)$$

eşitliği ile ifade edilir.

Nemli hava içerisindeki su buharı miktarının nemli hava hacmine oranına mutlak nem denir ve

$$\rho_b = \frac{m_b}{V} \quad (8)$$

eşitliği ile ifade edilir. Mutlak nem, su buharının nemli hava içerisindeki kısmi yoğunluğudur.

İdeal gaz denkleminde yararlanılarak mutlak nem

$$\rho_b = \frac{P_b}{R_b T} \quad (9)$$

doyma durumundaki mutlak nem ise

$$\rho_{bd} = \frac{P_{bd}}{R_b T} \quad (10)$$

eşitlikleri ile ifade edilebilir.

Birim hacimde hava içerisinde buhar ağırlığının havanın toplam basınçta ve sıcaklıkta taşıyabileceği maksimum buhar ağırlığına oranı bağıl nem olarak tanımlanır. Dalton'un kısmi basınç oranları kanunu gereğince bağıl nem basınç oranlarına veya ağırlık oranlarına göre belirlenebilir.

$$BN = \frac{\rho_b}{\rho_{bd}} \quad (11)$$

Diğer bir ifade ile bağıl nem nemli hava içerisindeki su buharı kısmi basıncının aynı sıcaklığa karşılık gelen doyma basıncına oranına eşittir.

$$BN = \left(\frac{P_b}{P_{bd}} \right)_{t=\text{sabit}} \quad (12)$$

Özgül nemin doyma durumundaki özgül neme oranına doyma derecesi denir ve $\psi = \frac{x}{x_d}$ (13)

şeklinde ifade edilir. Bağıl nem ile doyma derecesine ilişkin eşitliklerden de görüleceği gibi, aralarında fark vardır. Doyma derecesi için

$$\psi = \left(\frac{P_b}{P_{bd}} \right) \left(\frac{P - P_{bd}}{P - P_b} \right) \quad (14)$$

veya bağıl nem ile ilişkili olarak

$$\psi = \varphi \left(\frac{P - P_{bd}}{P - P_b} \right) \quad (15)$$

eşitlikleri ifade edilebilir. Su buharı kısmi basıncı doyma durumundaki su buharı kısmi basıncından küçük veya ona eşit olduğundan doyma derecesi bağıl nemden $\left(\frac{P - P_{bd}}{P - P_b} \right)$ oranında küçüktür. Havanın nemliliği ile ilgili hesaplarda bağıl nem yerine doyma derecesine ilişkin bağıntılardan yararlanılacaksa bu farkın dikkate alınması gerekir.

Isıtılan binalarda oluşacak bağıl nem dış hava sıcaklığı, bağıl nemi, hava yenileme oranı, iç hava sıcaklığı ve içeride bulunan higroskopik maddelerden etkilenir. Bu çalışmada deney odası için, gerek havalandırma tekniğinde ve gerekse ısı hesaplarında gözönüne alınan hava yenilenme katsayısı 1 olarak belirlenmiştir [29, 37].

Nemli hava içerisinde doyma durumunda bulunabilecek su buharı miktarı sadece sıcaklığın fonksiyonu olarak değişir. Buna göre birim hacimdeki nemli hava içerisinde bulunabilecek su buharı miktarı sıcaklığın fonksiyonu olarak aşağıdaki eşitlikle ifade edilebilir [38].

$$\rho_{bd} = 4.84 + 0.3738 T + 0.0044 T^2 + 0.00037 T^3 \quad (16)$$

Düşük sıcaklıktaki nemli hava ısıtılırsa, doyma durumunda, içerisine alabileceği nem miktarı artacağından bağıl nemi düşer. Örneğin, 20 °C sıcaklıkta doyma haldeki nemli havanın 1 m³'ü içerisinde 17 g, 30 °C'de ise 30 g su buharı bulunmaktadır. Buna göre 20 °C'de doyma haldeki hava 30 °C'ye kadar ısıtılırsa bu durumda bağıl nemi $\varphi = (17/30) \times 100 = 56.7\%$ derecesine düşecektir. Aksine, yüksek sıcaklıktaki hava soğutulursa içerisine alabileceği nem miktarı azalacağından çığ noktası sıcaklığının altında bir miktar su buharı yoğunlaşır.

Dış hava içerisinde doyma halindeki nem miktarı sıcaklığın fonksiyonu olarak (16) nolu eşitlikten hesaplandıktan sonra, dış havanın aynı sıcaklıktaki bağıl nemine bağlı olarak içerisinde bulunan mutlak nem miktarı

$$\rho_{b,d} = \varphi_0 \rho_{bd,d} \quad (17)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Dış hava için hesaplanan nem miktarı ısıtılan mahal için hesaplanan doyma durumundaki nem miktarına oranlanarak mekan içi başlangıç bağıl nemi hesaplanır.

$$BN_{ib} = \frac{\rho_{b,d}}{\rho_{b,i}} \quad (18)$$

Bu şekilde hesaplanan iç bağıl nem, içeride nem kaynağının olmadığı hal için geçerlidir. Mahal içindeki havanın nemliliği ve dolayısıyla denge rutubeti üzerinde, başta odun olmak üzere içeride bulunabilecek higroskopik maddelerin etkisi sözkonusudur. Odunun rutubeti, miktarı ve yüzeyinin korunma durumu havanın bağıl nemini ve denge rutubetini etkileyen özelliklerdir. Bu özellikler bir c sabiti ile ifade edilirse, bu durumda nemli hava içerisinde bulunabilecek nem miktarı

$$\rho_b = \rho_{b,d} + c \Delta W \quad (19)$$

eşitliği ile hesaplanır. Burada ΔW rutubet değişim miktarı olup, hesaplar iterasyonla yapılır. Denklemdaki c sabitinin belirlenmesinde

$$c = \frac{M_0}{V_i t n} \quad (20)$$

eşitliği kullanılmıştır.

Buna göre odunun bulunduğu deney ortamındaki mutlak nem miktarı

$$\rho_b = \rho_{b,d} + 364.6 \Delta W \quad (21)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır.

Rutubet değişim miktarı

$$\Delta W = W_b - W_s \quad (22)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır.

Odun sonuç rutubeti

$$W_s = (W_b - a \text{ DRM}) e^{-\frac{bt}{\rho_0 e}} + a \text{ DRM} \quad (23)$$

bağıntısı yardımıyla hesaplanmıştır [34, 39, 40].

Odun denge rutubeti sıcaklık ve bağıl nemin fonksiyonu olarak (24) nolu bağıntı ile hesaplanmıştır [30, 31].

$$\text{DRM} = 0.383 + 0.190 \text{ BN} - 0.020 \text{ T}; R^2 = 0.986 \quad (24)$$

Isıtılan bina içinde odun esaslı malzemelerin bulunması hali için bağıl nem (25) nolu eşitlikle hesaplanmıştır.

$$BN_{im} = \frac{\rho_b}{\rho_{b,i}} \quad (25)$$

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULT AND DISCUSSION)

Trabzon için dış hava aylık sıcaklık ve bağıl nem verileri, iç hava sıcaklığı, bina içinde bulunan odun esaslı malzeme miktarı ve rutubetine göre hesaplanan bina içi bağıl nem aylık ortalamaları Tablo 1'de verilmiş, aylık ortalamaların değişimleri de Şekil 1'de gösterilmiştir.

Trabzon'da araştırma döneminde dış hava bağıl nemi yıllık ortalaması %76.7 olup, aylık bağıl nem ortalamaları %68.9 (Aralık ayında) ile %83.1 (Mart ayında) arasında değişmiştir. Yıllık ortalama dış hava sıcaklığı 14.7 °C olup, aylık ortalamalar 6.5 °C ile 23.8 °C arasında değişmiştir. Aylık sıcaklık ortalamalarının standart sapması 5.9 °C, bağıl nem ortalamalarının standart sapması ise % 4.1'dir. Özellikle bağıl nemin aylık ortalamaları arasındaki fark düşük olup, homojen bir dağılım gösterdikleri söylenebilir.

Bina içi havasının yıllık sıcaklık ortalaması 21.2 °C, aylık sıcaklık ortalamalarının standart sapması 1.7 °C'dir. Bunun iki nedeni, yaz aylarındaki aylık sıcaklık ortalamalarının 20 °C dolayında olması ve kış aylarında bina içinin ısıtılıyor olmasıdır. İç ve dış hava aylık sıcaklık ortalamaları arasında %5 yanılma olasılığı ile anlamlı bir fark vardır (F = 12.383, p = 0.02).

Mahal içinde odun esaslı malzemelerin bulunmadığı hal

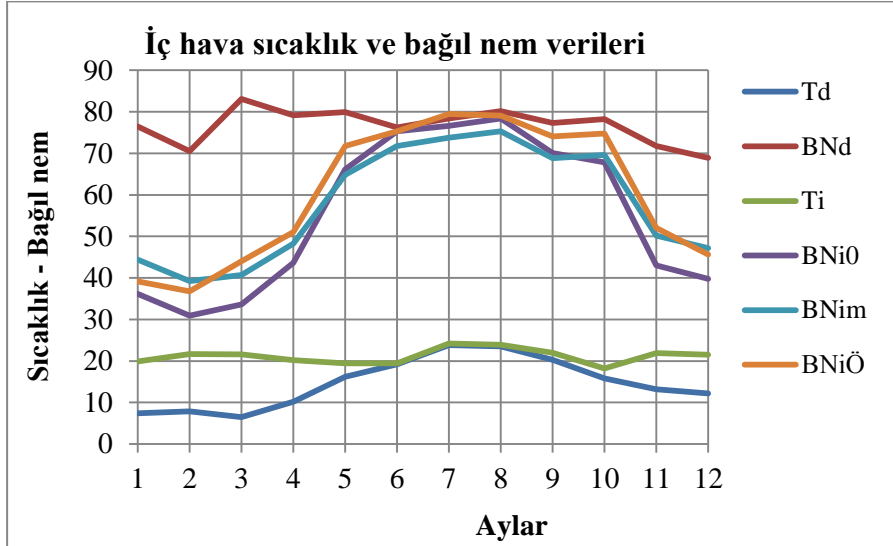
Çizelge 1. Trabzon için sıcaklık ve bağıl nem aylık ortalama değerleri (The monthly average temperature and relative humidity values for Trabzon)

Aylar	Dış hava		Bina içi				Bağıl nem farkları	
	Td	BNd	Ti	BNib	BNim	BNiö	BNd-BNib	BNd-BNim
Ocak	7.4	76.5	19.9	36.1	44.4	39.2	40.4	32.1
Şubat	7.9	70.5	21.7	30.9	39.3	36.8	39.6	31.2
Mart	6.5	83.1	21.6	33.6	40.7	44.0	49.5	42.4
Nisan	10.2	79.2	20.2	43.7	48.3	51.0	35.5	30.9
Mayıs	16.2	79.9	19.4	66.2	64.8	71.8	13.7	15.1
Haziran	19.2	76.2	19.4	75.3	71.7	75.3	0.9	4.5
Temmuz	23.8	78.4	24.2	76.6	73.8	79.5	1.8	4.6
Ağustos	23.5	80.2	23.9	78.4	75.3	79.1	1.8	4.9
Eylül	20.3	77.3	22.0	70.0	68.8	74.1	7.3	8.5
Ekim	15.8	78.2	18.2	67.9	69.6	74.8	10.3	8.6
Kasım	13.2	71.8	21.9	43.0	50.2	52.0	28.8	21.6
Aralık	12.2	68.9	21.5	39.8	47.2	45.6	29.1	21.7
Ortalama	14.7	76.7	21.2	55.1	57.8	60.3	21.6	18.8
Standart sapma	5.9	4.1	1.7	17.9	13.4	16.1	16.7	12.5
Kış ortalaması	10.5	75.5	20.7	42.1	48.5	49.1	33.3	26.9
Yaz ortalaması	20.6	78.4	21.8	73.3	70.9	76.0	5.1	7.5

için bina içi bağıl nem aylık ortalamaları % 30.9 ile % 78.4 arasında değişmiş ve yıllık ortalaması %55.1 olmuştur. Bu hal için bina içi bağıl nem aylık ortalamalarının standart sapması %17.9'dur. Bu farkın oluşmasında en önemli etken, ısıtılan kış aylarında iç bağıl nemin dış hava bağıl nemine oranla azalmasıdır.

bağıl nemin odun esaslı malzemenin etkisi ile dengelenmekte olduğunu göstermektedir.

Şekil 2'de, iç mekanda odun esaslı malzemelerin bulunması halinde ($m = 8,75 \text{ kg/m}^3$) kış aylarında bağıl nemi azaltıcı yaz aylarında ise artırıcı etki yaptığı ve böylece bağıl nemin dengelenmesinde önemli bir etkiye

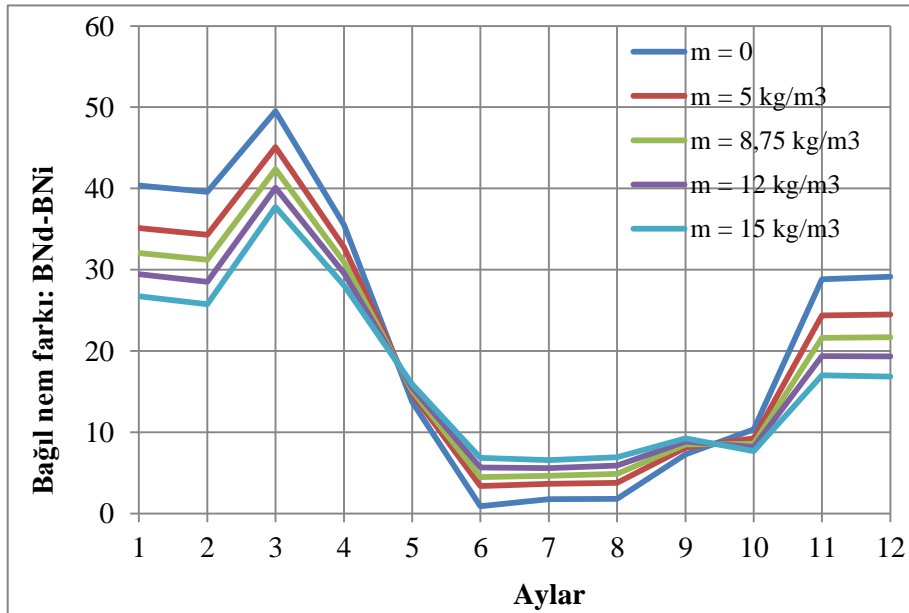


Şekil 1. Dış ve iç hava sıcaklık ve bağıl nem aylık ortalama değerleri (Outside and indoor air temperature and relative humidity monthly average values)

Mahal içinde birim hava hacmi başına bulunan odun esaslı malzeme miktarının 8.75 kg/m^3 olduğu durumda, en düşük bağıl nem aylık ortalaması % 39.1 ile Şubat

sahip olduğu görülmektedir.

Dış hava bağıl nemi aylık ortalamaları ile bina içi bağıl nem aylık ortalamaları arasında en büyük fark; odun



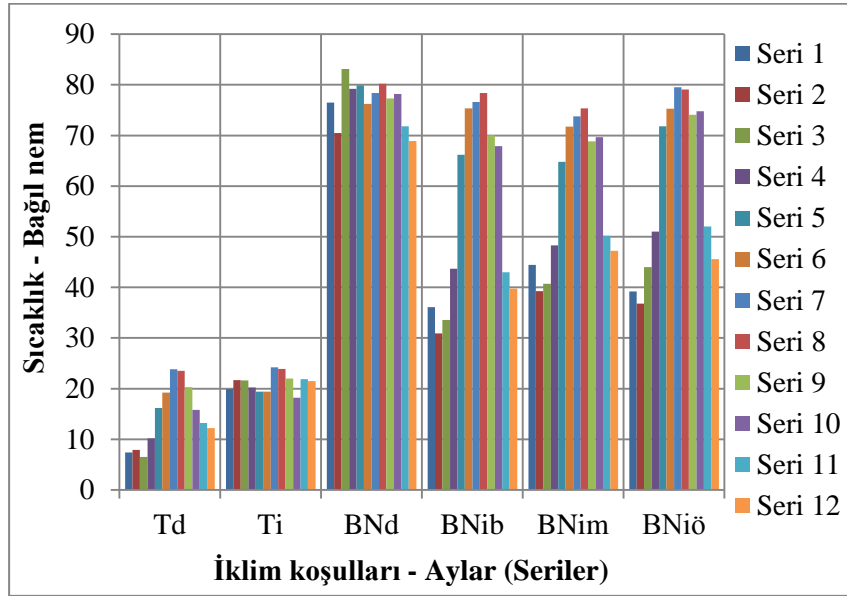
Şekil 2. Bağıl nem aylık ortalamalar farkı (The relative humidity monthly averages difference)

ayında, en yüksek bağıl nem aylık ortalaması ise % 75.4 ile Ağustos ayında meydana gelmiştir. Yıllık iç bağıl nem ortalaması %57.8, aylık iç bağıl nem ortalamalarının standart sapması % 13.4'dür. Bu veriler, aylık iç bağıl nem ortalamaları arasındaki farkın azaldığını ve iç

esaslı malzemenin bulunmadığı hal için %49.5 ile Mart ayında, en düşük fark ise %0.9 ile Haziran ayında meydana gelmiştir. Odun esaslı malzemelerin bulunduğu hal ($m = 8.75 \text{ kg/m}^3$) için dış ve iç bağıl nem aylık ortalamaları arasındaki fark %42.5 ile Mart ayında en yüksek, %4.4 ile Haziran ayında en düşük olmuştur. Benzer şe-

kilde, bağıl nem aylık ortalamaları $m = 5 \text{ kg/m}^3$ için %3.4 ile %45.1 arasında, $m = 12 \text{ kg/m}^3$ için %5,6 ile %40.1 arasında ve $m = 15 \text{ kg/m}^3$ için %6.5 ile % 37.7 arasında değişmektedir. Görüleceği gibi, bina içi aylık bağıl nem ortalamaları arasındaki farklar ısıtma döneminde (kış aylarında) yüksek, yaz aylarında düşüktür. Aynı şekilde bina içinde kullanılan odun esaslı malzeme

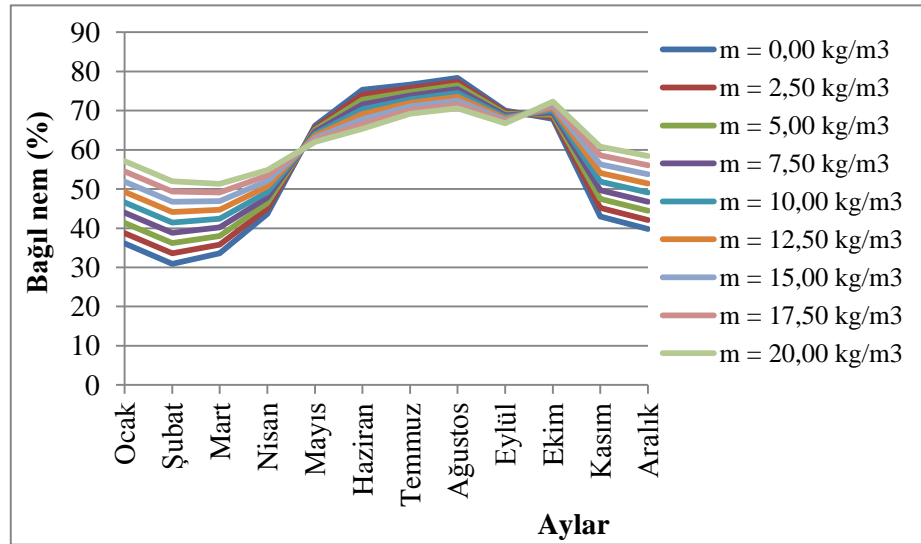
Isıtılan bina içi iklim koşullarında ortalama dış ortam sıcaklığı ve bağıl nemine bağlı olarak odun esaslı malzeme bulunmadığı halde, odun esaslı malzemenin bulunduğu halde hesaplanan ve ölçülen bina içi bağıl nem aylık ortalamaları arasında %5 yanılma olasılığı ile anlamlı bir fark bulunmamıştır ($F = 0.120$, $p = 0.887$).



Şekil 3. İç ve dış hava iklim verileri (Indoor and outdoor climate data)

miktarının artmasına bağlı olarak aylık bağıl nem ortalamaları arasındaki farklar azalmaktadır.

Bina içi bağıl nem aylık ortalamaları dış ortam bağıl nem aylık ortalamaya değerlerinin altında seyretmiştir. Bina içi bağıl nem aylık ortalamaları kış (ısıtma) aylarında yaz aylarına göre daha fazla azalma göstermektedir.

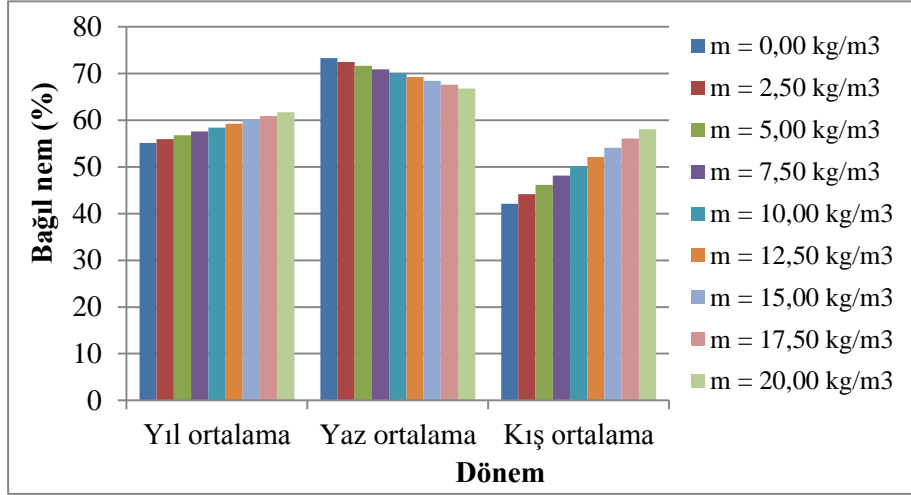


Şekil 4. Odun miktarına göre aylık ve mevsimlik bağıl nem değişimi (The monthly and seasonal change of the relative humidity considering the amount of wood)

Şekil 3'de iklim verilerinin aylık değişimleri gösterilmiştir. Dış hava sıcaklığının Ocak ayından Temmuz ayına kadar artış gösterdiği, bundan sonra aynı şekilde azaldığı görülmektedir.

Odun esaslı malzemenin mahal içi bağıl nemi üzerine etkilerini değerlendirmek üzere yapılan hesaplamalarda

yatırım ve işletme maliyetleri sözkonusudur. Bu makalede doğal yolla havalandırılan bir binanın salonuna



Şekil 5. Odun miktarına bağlı olarak mahal içi bağıl nemin mevsimlik değişimi (The seasonal variation of the relative humidity depending on the amount of wood)

belirlenen bağıl nem aylık ortalamaları Şekil 4’de, mevsimlik ortalamaları ise Şekil 5’de gösterilmiştir. Mahal içinde birim hacim başına odun miktarı arttıkça, yaz aylarında bağıl nemi azaltıcı, kış aylarında ise artırıcı olmak üzere, yıl ortalaması itibariyle toplamda artırıcı etki yapmaktadır. Mahal içinde odun esaslı malzemenin bulunmadığı halde bağıl nem aylık ortalamalarının standart sapma değeri %18.7 iken, 20 kg/m³ odunun bulunduğu halde %7.2 değerine düşmektedir. Bu bulgular, odun esaslı malzemenin bağıl nemi homojenleştirici etki yaptığını göstermektedir. Böylece, odun, kapalı mekanlarda kış aylarında bağıl nemi artırarak, yaz aylarında ise azaltarak yaşama konforuna yardımcı olmaktadır.

Bina içinde odun esaslı malzemenin bulunmadığı varsayımı halinde iç bağıl nem ile dış sıcaklık, dış bağıl nem ve iç sıcaklık arasındaki regresyon denklemi aşağıdaki

$$BN_{ib} = 11.410 + 3.105 T_d + 0.716 BN_d - 2.682 T_i; R^2 = 0.994 \quad (26)$$

gibi oluşmuştur.

Bina içinde birim hacim başına 8.75 kg/m³ odun esaslı malzemenin bulunduğu durumda iç bağıl nem ile dış sıcaklık, dış bağıl nem ve iç sıcaklık arasındaki regresyon denklemi aşağıdaki gibi oluşmuştur.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

İnsan sağlığı, konforu ve üretkenliği açısından ortam bağıl neminin %40 – 60 arasında olması uygun görül-

$$BN_{im} = 34.476 + 2.360 T_d + 0.427 BN_d - 2.086 T_i; R^2 = 0.992 \quad (27)$$

mektedir. Bu sınırlar arasında bulunan bağıl nem aynı zamanda patojenik ve alerjik organizmaların ürememesi açısından da uygun ortamlardır. İç hava kalitesi doğal veya teknik yöntemlerle sağlanırken, teknik yöntemlerin

ilişkin bağıl nem değerleri sayısal olarak incelenmiştir.

Trabzon’da ortalama dış ortam sıcaklığına göre bina içi aylık bağıl nem ortalamaları odun esaslı malzemelerin bulunmaması hali için %30.9 ile Şubat ayında en düşük, % 78.4 ile Ağustos ayında en yüksek bulunmuştur. Bu koşullarda iç bağıl nem gerek ısıtma döneminde ve gerekse ısıtma dönemi dışında dış ortam bağıl nem aylık ortalamalarının altında seyretmiştir. Kış aylarında bina içinde oluşan bağıl nem değerleri literatürde önerilen hava kalitesi ile uyumludur. Yaz aylarında ise bina içi bağıl nem aylık ortalamaları %66.2 ile %78.4 arasında değişmekte ve bu değerlerin hava kalitesi ile uyumlu olmadığı görülmektedir.

Bina içinde m = 8.75 kg/m³ odun esaslı malzemenin bulunduğu halde kış aylarında bağıl nem %39.3 ile %67.9 arasında değişmekte ve istenen hava kalitesi ile büyük ölçüde uyumludur. Yaz aylarında ise aylık bağıl nem or-

talamaları %64.8 ile %75.3 arasında değişmekte, odun esaslı malzemelerin bulunmadığı hale göre daha düşük değerler almaktadır.

Dış havanın sıcaklığı ve bağıl nemi düşük olduğu ölçüde mahal içi bağıl nemi düşmektedir. Kış aylarında mahal içine giren hava bina içi sıcaklığına kadar ısıtılmakta ve bu sıcaklıkta sabit tutulduğu varsayılmaktadır. Dış hava ile mahal içindeki sıcaklıklar arasındaki farkın ölçüsü olarak dış hava ve mahal içi havasının bağıl nemi

arasındaki fark kış aylarında artmakta, yaz aylarında ise azalmaktadır.

Künzel (2015), bina zarf sistemlerinin nem üzerine etkilerine yönelik yaptığı araştırmada Almanya iklim koşullarında bina içinde odun esaslı malzemelerin bulunduğu durum için bina içi bağıl nemin kış aylarında %30-40 arasında, yaz aylarında ise %50-60 arasında değiştiğini belirtmiştir. Mevcut çalışmada bina içi bağıl nemin kış aylarında düşük, yaz aylarında yüksek çıkması bu araştırmanın sonuçları ile uyumludur [24].

Künzel vd. (2005), ısıtılan oda içerisinde bitkiler ve mobilyalar aracılığı ile salınan nemin $0.5 - 2 \text{ g/m}^3\text{h}$ arasında olduğunu belirtmiştir. Mevcut araştırmada da odun esaslı malzemelerin nem salımı ve nem alma değerleri $- 0.23 \text{ g/m}^3\text{h}$ ile $1.57 \text{ g/m}^3\text{h}$ arasında değişmiş ve her iki araştırma sonuçları arasında uyum görülmüştür [25].

Isıtılan mahalde odun esaslı malzemenin bulunmadığı halde yıllık bağıl nem ortalaması %55.1 iken, odun esaslı malzemenin bulunduğu halde (8.75 kg/m^3) %57.8 olarak gerçekleşmiştir. Benzer şekilde, kış aylarında ortalama bağıl nem odun esaslı malzemenin bulunmadığı halde %42.1 iken odun esaslı malzemenin bulunduğu halde %48.5 olmuştur. Buna karşılık, yaz döneminde mahal içi bağıl nem ortalaması odun esaslı malzemenin bulunmadığı durumda %73.3 iken, odun esaslı malzemenin bulunduğu durumda %70.9 olmak üzere daha düşük düzeyde gerçekleşmiştir. Ayrıca, mahal içi bağıl nem yıllık ortalamasının standart sapması boş halde % 17.9 iken, odun esaslı malzemenin bulunduğu halde %13.4 olarak bulunmuştur. Bu bulgular, ısıtılan bina içi koşullarda odun esaslı malzemelerin bulunması halinde bağıl nemin aylık ortalamaları arasındaki farkın azaldığını göstermektedir.

Mahal içinde odun esaslı malzemelerin bulunması durumunda aynı koşullarda bağıl nem değeri değişmektedir. Mahal içindeki odunun rutubeti normal koşullarda oluşan denge rutubetinden yüksekse havaya nem vererek rutubet kaybetmekte ve havanın neminin artmasına yol açmaktadır. Odun rutubetinin normal koşullardaki denge rutubetinden düşük olması halinde ise havadan nem alarak nemini artırırken havanın neminin azalmasına yol açmaktadır. Belirtilen her iki durumda da yıl boyunca gerçekleşen mahal içi denge rutubeti değerleri arasındaki fark azalmaktadır.

Mahal içinde odun bulunmadığı durumda yıllık bağıl nem ortalaması %55.9, standart sapması ise %18.7 olarak oluşurken, 20 kg/m^3 odunun bulunduğu durumda yıllık bağıl nem ortalaması %61.7 değerine yükselirken standart sapması % 7.2 değerine düşmektedir.

Bina içerisinde bulunan odun esaslı malzeme miktarı arttıkça aylık bağıl nem ortalamaları arasındaki farkın azaldığı ve odun esaslı malzemenin bağıl nemi dengeleyici etki yaptığı görülmüştür

Higroskopik özelliğe sahip olan odun esaslı malzeme, bina içi koşullarda bağıl nemin yüksek olduğu yaz aylarında bağıl nemi düşürücü, bağıl nemin düşük olduğu kış aylarında ise artırıcı etki yapmakta ve yaşam açısından uygun koşullar sağlamaktadır.

Odun-hava arasındaki nem difüzyonu üzerinde odun esaslı malzemelerin vernikli olmalarının olumsuz etkileri vardır. Bu nedenle, yaşanan mekanlarda havanın nem kalitesi ile ilgili bir talep sözkonusu ise; kullanılacak odun kökenli malzemelerin verniksiz veya sadece koruyucu boyalarla boyanmış halde kullanılmaları yararlı olabilir.

SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

x: Özgül nem, g/kg

x_d : Doyma halinde özgül nem, g/kg

m_b : Su buharı miktarı, g

m_h : Kuru hava miktarı, kg

P_b : Su buharı kısmi basıncı, N/m^2

P_{bd} : Doyma halinde su buharı kısmi basıncı, N/m^2

P_h : Kuru hava kısmi basıncı, N/m^2

P: Karışım basıncı, N/m^2

R_b : Su buharı gaz sabiti, J/kgK

R_h : Kuru hava gaz sabiti, J/kgK

V: Nemli hava hacmi, m^3

T: Karışım sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

T_i : İç ortam sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

T_d : Dış hava sıcaklığı, $^{\circ}\text{C}$

ρ_b : Mutlak nem, g/m^3

$\rho_{b,d}$: Dış hava mutlak nemi, g/m^3

ρ_{bd} : Doyma halinde mutlak nem, g/m^3

$\rho_{bd,d}$: Doyma halinde dış hava mutlak nemi, g/m^3

$\rho_{bd,i}$: Doyma halinde iç hava mutlak nemi, g/m^3

BN : Bağıl nem

BND : Dış hava bağıl nemi

BNib : Odun esaslı malzeme bulunmadığı durumda iç bağıl nem

BNim : Odun esaslı malzeme bulunduğu durumda iç bağıl nem

BNiö : Mahal içinde ölçülen bağıl nem

Ψ : Doyma derecesi

Wb : Başlangıç rutubeti

Ws : Sonuç rutubeti

ΔW : Rutubet farkı

M_o : Tam kuru odun ağırlığı, g

m : Birim iç hava hacmi başına odun esaslı malzeme miktarı, kg/m^3

V_i : Deney odası net (hava) hacmi, m^3

n : Hava yenileme oranı, 1/saat

t : Zaman, saat

c : Sabit (M_o , V_i , n, t parametrelerinin fonksiyonu)

a, b : Sorpsiyon katsayıları

DRM : Odun denge rutubeti (%)

ρ_o : Tam kuru odun yoğunluğu, kg/m^3

e : Odun kalınlığı, mm

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Akyazı, Ö., Usta, M. A. ve Akpınar, A. S., “Kapalı ortam sıcaklık ve nem denetiminin farklı bulanık üyelik fonksiyonları kullanılarak gerçekleştirilmesi”, 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11), 16-18 May 2011, Elazığ, Turkey, (2011).
- [2] Ekmekyapar, T., “Tarımsal yapılarda çevre koşullarının düzenlenmesinde ve bitkisel ürünlerin kurutulmasında, depolanmasında psikrometrinin önemi”, *Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 3-4: 161-176, (1979).
- [3] Simonson, C. J., Salonvaara, M. ve Ojanen, T., “The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality”, *Indoor Air*, 12: 243–251, (2002).
- [4] Dorgan, C. B., Dorgan, C. E., Kanarek, M. S. ve Wilman, A.J., “Health and productivity benefits of improved indoor air quality”, *ASHRAE Transactions*, 99: 1099-1103, (1998).
- [5] Fisk, V. J. ve Rosenfeld, A. H., “Estimates of improved productivity and health from better indoor environments”, *Indoor Air*, 7: 158-172, (1997).
- [6] Wargocki, P., Wyon, D. P., Baik, Y. K., Clausen, G. ve Fanger, P. O., “Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads”, *Indoor Air*, 9: 165-179, (1999).
- [7] Wargocki, P., Wyon, D. P. ve Fanger, P. O., “Productivity is affected by the air quality in offices”, *Proceedings Healthy Buildings*, 1: 635-640, (2000).
- [8] Olesen, B. W. ve Parsons, K. C., “Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730”, *Energy and Buildings*, 34, 6: 537–548, (2002).
- [9] Fang, L., Clausen, G. ve Fanger, P. O., “Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality”, *Indoor Air*, 8: 80–90, (1998).
- [10] Arundel, A. V., Sterling, E. M., Biggin, J. H. ve Sterling, T. D., “Indirect health effects of relative humidity in indoor environments”, *Environ Health Perspect.*, 65: 351–361, (1986).
- [11] Oesh, S. ve Faller, M. “Environmental effects on materials: The effect of the air pollutants SO₂, NO₂, NO and O₃ on the corrosion of copper, zinc and aluminium. A short literature survey and results of laboratory exposures”, *Corrosion Science*, 39, 9: 1505-1530, (1997).
- [12] Mendoza, A. R. Ve Corvo, F., “Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel”, *Corrosion Science*, 41, 1: 75-86, (1999).
- [13] Kurtoğlu, A., “Malzemelerin işleme özellikleri”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, B, 31, 2: 179-199, (1981).
- [14] Haghghat, F. ve De Bellis L., “Material emission rates: Literature review, and the impact of indoor air temperature and relative humidity”, *Building and Environment*, 33, 5: 261-277, (1998).
- [15] Besant, R. W. ve Simonson, C. J., “Air – to – air energy recovery”, *ASHRAE Journal*, 42: 31-42, (2000).
- [16] Kurtoğlu, A., “Hava kurusu odunda rutubet değişimleri ve Türkiye’de odunun muhtemel denge rutubeti miktarlarının dağılımı”, İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları No. 362. İstanbul, (1984).
- [17] Salonvaara, M., Ojanen, T. ve Simonson, C., “Indoor air quality in a wooden house”, www.researchgate.net/...Indoor_Air_Quality, (2004).
- [18] Rahle, U., “Desiccant kurutma ile nem kontrolü”, *Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 95: 37-42, (2006).
- [19] Shaman, J. ve Kohn, M., “Absolute humidity modulates influenza survival, transmission, and seasonality”, *PNAS*, 106, 9: 3243 – 3248, (2009).
- [20] Shaman, J., Pitzer, V. E., Vibout, C., Grenfell, B. T. ve Lipsitch, M., “Absolute humidity and the seasonal onset of influenza in the continental United States”, *PloS Biology*, 8, 2 (2010) e1000316; www.plosbiology.org, (2010).
- [21] Türkteş H. ve Türkteş İ. “Astma”, Bozkır Matbacılık, Ankara, (1998).
- [22] Çölaşan, F., “Yapılarda hava kalitesi ve enerji ekonomisi”, II. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Bildiriler Kitabı, Cilt I, Ekim 1995, 9-11, İzmir, (1995).
- [23] Toksoy, M., “Isıl konfor ve üretkenlik”, II. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, Bildiriler Kitabı, Cilt I, Ekim 1995, 31-38, İzmir, (1995)
- [24] Kunzel, H. M., “Indoor relative humidity in residential buildings – A necessary boundary condition to assess the moisture performance of building envelope systems”, <http://wufi.de/literatur/Kunzel>, 30.05.2015.
- [25] Kunzel, H. M., Holm, A., Zirkelbch, D. ve Karagiozis, A. N., “Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope”, *Solar Energy*, 8: 554-561, (2005).
- [26] Hohota, R., Rusaouen, G. ve Woloszyn, M., “Numerical prediction of indoor air humidity and its effect on indoor environment”, *Building and Environment*, 38, 5: 655-664, (2003).
- [27] Andersen, I. ve Korsgaard, J., “Asthma and the indoor environment: Assessment of the health implications of high indoor air humidity”, *Environment International*, 12, 1-4: 121-127, (1986).
- [28] Wolkof, P. ve Kiaergaard, S. K., “The dichotomy of relative humidity on indoor air quality”, *Environment International*, 33, 6: 850-857, (2007).
- [29] MMO, “Kalorifer tesisatı”, Makina Mühendisleri Odası Yayın No: 352, Ankara, (2010).
- [30] Simpson, W. T., “Drying and control of moisture content and dimensional changes, Wood handbook: wood as an engineering material”, Madison WI: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. General technical report FPL ; GTR-113, 12: 1-20, (1999).
- [31] Üçüncü, K., “Karadeniz bölgesinde bina içi iklim koşullarında odun denge rutubeti dağılımının analizi”, *KAÜ Artvin Orman Fakültesi Dergisi*, 6 (1-2): 46 – 58, (2005).

- [32] Lü, I., "Modelling heat and moisture transfer in buildings I. model program", *Energy and Buildings*, 34: 1033-1043 (2002).
- [33] Berkel, A., "Kerestenin doğal ve hızlandırılmış doğal kurutulması tekniği", İÜ Orman Fakültesi Yayınları No. 266, İstanbul, (1978).
- [34] Bulut, H., Büyükalaca, O. ve Yılmaz, A., "Türkiye'nin 15 ili için bazı iklim verilerinin eşitliklerle ifadesi", TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Tesisat Mühendisliği Dergisi, 51, 48-56 (1999).
- [35] Ayhan, T., "Nemli hava termodinamiği: Ders notları", Karadeniz Teknik Üniversitesi Ders Notları No: 16, Trabzon, (1988).
- [36] Ji, X., "Thermodynamic properties of humid air and their application in advanced power generation cycles", KTH-Royal Institute of Technology Department of Chemical Engineering and Technology, Doktora Tezi, (2006).
- [37] Osborne, W.C. ve Turner, C.G., "Pratik havalandırma tesisleri kılavuzu", Cilt I, Çev.: U. Köktürk, Arpaz Matbaacılık, İstanbul, (1975).
- [38] Villiere, A., "Sechage des bois", Dunod, Paris, (1966).
- [39] Üçüncü, K., "Tam kuru doğu kayını (*Fagus orientalis*) odununun adsorpsiyon özellikleri", *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, B, 57, 2: 45-59, (2007).
- [40] Üçüncü, K., Aydın, A. ve Taşdemir, T., "Bazı ağaç türü odunlarının sorpsiyon özelliklerinin incelenmesi", Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi, Proje Kod No: 2006.113.002.3, Trabzon, (2010).

Atomik Tabaka Biriktirme Metodu ile Üretilen HfO₂ Tabanlı Sensörlerin Hidrojen Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi

Irmak KARADUMAN¹, Özlem BARİN¹, Dilber Esra YILDIZ², Selim ACAR¹

¹Gazi Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 06500, ANKARA

²Hitit Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 19030, ÇORUM

(Geliş / Received : 06.07.2015 ; Kabul / Accepted : 30.10.2015)

ÖZ

Fosil yakıtların yakın gelecekte tükenecek olmaları ve çevreye CO₂ gibi zararlı atıklar bırakmaları temiz, güvenilir ve geleceğin enerji kaynağı olan H₂ gazının çok geniş ve değişik alanlarda kullanılmasının önünü açmıştır. Bu durum uygulama alanlarının hızla genişlemesine ve araştırmacıların H₂ gaz sensörü üzerine yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Bu çalışmada p-Si yarıiletken üzerine Atomik Tabaka Biriktirme (ALD) yöntemi ile HfO₂ ince film büyütülerek HfO₂/p-Si yapı oluşturuldu. Üretilen numunenin farklı sıcaklıklarda (30°C-180°C) ve farklı gaz konsantrasyonlarında (1000ppm-4000ppm) zamana bağlı olarak hidrojen gazı için algılama özellikleri incelendi. Yapılan ölçümler sonucunda üretilen HfO₂/p-Si ince filmlerin düşük sıcaklık hidrojen gaz sensörü olarak kullanılabilirliği görüldü.

Anahtar Kelimeler: Gaz Sensör, ALD, Hidrojen

Investigation of Hydrogen Gas Sensing Properties of HfO₂ Based Sensor Produced By Atomic Layer Deposition Method

ABSTRACT

Fossil fuels can very quickly be exhausted condition and thus leave harmful residues such as CO₂ environment clean and reliable use of the H₂ gas as the energy source of the future are expanded in various fields. In this case, the new research on the rapidly expanding field of applications and H₂ gas sensor causes the increase.

In this study, HfO₂ thin films are grown on the p-Si by Atomic Layer Deposition (ALD) method and HfO₂/p-Si thin film was produced. HfO₂/p-Si structure is grown by Atomic Layer Deposition method and hydrogen gas sensing properties were investigated. Produced sample at different temperatures (30 °C-180 °C) and at different gas concentrations (1000ppm-4000ppm) as a function of time is investigated with measuring the electrical properties. Measurement results show that HfO₂/p-Si thin films produced by ALD can be used as low temperatures hydrogen gas sensors.

Keywords: Gas Sensor, ALD, Hydrogen

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya nüfusu ve endüstriyel gelişmelere paralel olarak enerji gereksinimi giderek artmakta ve fosil enerji kaynaklarının rezervleri hızla tükenmektedir. Buna karşın nüfusun artması ile birlikte teknoloji kullanımı ve araç sayısındaki artışa da bağlı olarak enerjiye olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Geleneksel enerji üretim ve tüketiminin hem çevre hem de doğal kaynaklar üzerinde yerel ve küresel seviyede olumsuz etkilerinin olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, yenilenebilir enerji ve yakıt kaynaklarına olan ilginin artmasına yol açmıştır [1-5]. Özellikle motor ve araç teknolojisi açısından yaygın kullanılabilir alternatif yakıtlar depolama ve çevreci

olması gibi özelliklerinin yanı sıra içten yanmalı motorlarda verimli bir şekilde kullanılabilmesi ve fosil yakıt türleri ile rekabet edebilir olmalıdır. Bu da ucuz ve bol miktarlarda üretilebilmesi, ısı değerlerinin yüksek olması, kolayca depolanabilmesi ve taşınabilmesi demektir. Sınırlı rezerve sahip olan petrol ürünlerinin yerine hidrojenin içten yanmalı motorlarda kullanılması, son yıllarda özellikle araç üreten şirketlerin ilgisini çekmektedir. Alternatif yakıt olarak tercih edilen hidrojen, havayı kirletmemesi ve elde edilebilirliğinin kolay olması nedeniyle önemi her geçen gün biraz daha artmaktadır ve bu yakıt ile çalışabilecek yeni teknolojiler ve cihazlar geliştirilmektedir [6-7]. Hidrojen (H) en hafif element olup, havadan 14,4 kez daha hafif bir gazdır. Havada 100 ppm (%0,01) oranında bulunur, kokusuz, renksiz, tatsız ve zehirsizdir. Yanıcı bir gazdır, hava veya oksijen ile karıştırıldığında çok geniş bir

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: karaduman.irmak@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 223-229

aralık için patlayıcı özelliğe sahiptir. Bu nedenle, hidrojen gazı sızıntısının algılanması son derece önemlidir ve bu durum araştırmacıları düşük konsantrasyonlu hidrojen gazı sızıntısını algılama yeteneğine sahip hidrojen sensörlerinin tasarlanmasına ve üretilmesine yöneltmiştir [8].

Gaz sensörünün temel algılama mekanizması yüzeye gönderilen kuru hava ile hedef gaz arasındaki kimyasal reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar algılama yüzeyindeki taşıyıcıları değiştirmekte, böylece sensor sinyali elde edilebilmektedir [9-10]. Farklı üretim metodları, katkılama, farklı kontak materyalleri, farklı metal oksit yüzeylerinin kullanılması gaz sensörlerinin duyarlıklarına etki etmektedir. Phanichphant, RF magnetron saçtırma, reactive RF saçtırma, electrospinning, spray pyrolysis ve hidrotermal solüsyon tabanlı yöntemlerle metal oksit malzemelerini büyütmüş ve hidrojen gazına karşı gaz algılama özelliklerini incelemiştir. Yaptığı çalışma sonucu spray pyrolysis metodu ile büyüttüğü numunelerde maksimum duyarlık elde ettiğini rapor etmiştir [11]. Adamyan ve ark., sol jel metodu ile kalay oksit ince filmler üretmişler ve 130°C'de 5000 ppm hidrojen gazı için maksimum duyarlık elde ettiklerini bildirmişlerdir [12]. Steinebach ve ark. ürettikleri NiO numunelerinin 650°C'de 10,000 ppm hidrojen gazı için maksimum duyarlık elde ettiklerini bildirmişlerdir [13]. Yapılan literatur çalışmaları göstermektedir ki farklı üretim metodları farklı duyarlıklara yol açmaktadır [14-16]. ALD metodu ince film üretim tekniklerinden birisidir. Bu teknik atomik ölçekte yüksek hassasiyette uygun yüzeyler üretebilmekte ve hassas film kalınlığı kontrolü yapabilmektedir. Bu nedenle ince film teknolojisinde büyük avantajlar sağlayan bir üretim tekniğidir [17]. ALD metodu, gaz fazındaki öncül maddelerin çok yüksek sıcaklıklara çıkmadan yüzeye tutunabilmeleri nedeniyle düşük sıcaklıkta yüksek kalitede ince filmlerin üretilmesine olanak sağlamaktadır [18-19]. Çoğu gaz sensörlerinin çalışma sıcaklığı oldukça yüksektir. Çalışma sıcaklığının yüksek olması, yüksek güç tüketimine ve yüksek maliyete sebep olmaktadır. Son yıllardaki çalışmalarda oda sıcaklığında duyarlık gösteren, düşük güç tüketimi yapan sensörlerin geliştirilmesi hedeflenmektedir [20].

Bu çalışmada, ALD metodu ile üretilen HfO₂ numunesinin H₂ gazına karşı gaz algılama özellikleri incelendi. Üretilen numunenin farklı sıcaklıklarda (30°C-180°C) ve farklı gaz konsantrasyonlarında (1000ppm-4000ppm) zamana bağlı olarak elektriksel karakterizasyonu yapıldı. Ölçüm sonuçlarından, numunenin duyarlılığının, sıcaklık ve gaz konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği görüldü.

2. DENEYSEL SİSTEM(EXPERIMENTAL SETUP)

(100) yönelimli, 0,5 mm kalınlıktaki ve 5-10 Ω.cm öz dirençli p tipi silisyum (Si) alttaş kullanıldı. p-Si alttaş üzerine ALD metodu ile HfO₂ metal oksit büyütüldü. Temizleme işleminde kullanılacak tüm

beherler ve tutucular deiyonize su (18 MΩ.cm) ile temizlenip saf (%99,999) azot gazı ile kurutuldu. Daha sonra silisyum yaprak, trikloretilen (CH₂Cl₂), aseton (CH₃COCH₃) ve methanol (CH₃OH) ile temizlendi. Kimyasal aşındırma için birbiri ardına H₂SO₄, H₂O₂, (3:1:1) HF ve HNO₃, HF, H₂O (6:1:3) uygulandı ve tekrar Si yaprak deiyonize su (18 MΩ.cm) ile yıkandı.

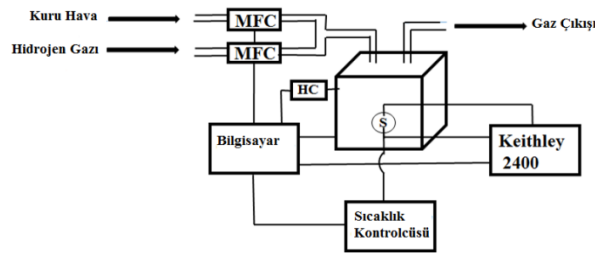
Kimyasal temizlik işlemi sonrası Si yarıiletken Savannah 100 ALD sistemi (Cambridge Nanotech Inc.) kullanılarak, 10 nm kalınlıkta HfO₂ metal oksit malzeme ile kaplandı. ALD, ardışık doygun yüzey reaksiyonları tabanlı bir kimyasal buhar biriktirme metodudur. Her seferinde bir öncül madde yüzeye gönderilir ve tek tabaka ile yüzey doygun hale getirilir. Bu özelliği ile diğer kimyasal buhar metodlarından ayrılır. ALD metodu, tüketim bölgesi etkilerini ve film kalınlığının kontrol edilebilir olduğundan dolayı film kalitesini arttırmaktadır. Savannah 100 sisteminde döngü başına 1,01Å kalınlık oluşmaktadır. Öncül maddelerden HfO₂ kaynağı olarak Hf(NMe₂)₄ kullanılmıştır. Sistem çalışması 4 döngüden meydana gelmektedir. İlk olarak yüzeye Hf(NMe₂)₄ gönderilir (0,2 saniye boyunca). İkinci döngüde H₂O gönderilir (0,015 saniye boyunca). Üçüncü ve dördüncü döngüler sırasıyla devam eder. Bu şekilde bir periyotta sabit bir kalınlık elde edilmesi sağlanır. İstenilen kalınlıkların elde edilmesi için uygun döngü sayısı ile üretim yapılır [21].

Üretilen numunenin kalınlık ölçümleri için elipsometri sistemi kullanılmıştır (J.A.Woolam Co, Inc., V-VASE). 200-400 nm dalga boyu aralığında ölçümler yapılmıştır. Silisyumun brewster açısı 74° olduğundan dolayı, 65°-70° ve 75°'lik açılarda ölçümler alınmıştır. Literatürde HfO₂ malzemenin kırılma indisi 2,11 olarak verilmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda numunenin kalınlığı, 10 nm; kırılma indisi, 2 olarak tesbit edildi [22-25].

Numune için gerekli metal kontaklar termal buharlaştırma sistemi kullanılarak oluşturuldu. Omik kontak için yüksek saflıktaki (%99,999) alüminyum (Al), termal buharlaştırma sistemindeki tungsten flaman üstüne konuldu. 10⁻⁶Torr basınca ulaşıldığında flaman üzerinden akım geçirilerek numune yüzeyine 2000 Å kalınlığında alüminyum buharlaştırıldı. Daha sonra tavlama sistemi kullanılarak 450 °C'de 5 dk süreyle tavlandı ve böylece omik kontak yapıldı.

Gaz sensör ölçüm sistemi; Keithley 2400 akım gerilim ölçüm sistemi, LakeShore 325 sıcaklık kontrol ünitesi, test hücresi (S), nem kontrolcüsü (HC) ve MKS serisi gaz akış kontrolcülerinden (MFC) oluşmaktadır. Zamana ve gaz konsantrasyonuna bağlı direnç ölçüm sistemi bilgisayar kontrollüdür. LakeShore 325 sıcaklık kontrol ünitesi PID sistemle sıcaklık kontrolü yapabilmektedir. Gaz akış kontrolcüsü, vakumlanabilir hücreye giren gazın akış hızını yüksek duyarlılıkta ayarlanmasını sağlamaktadır. Gaz akış kontrolcüsünün birinden kuru hava diğerinden etkisi incelenecek gaz geçmektedir ve bu kontrolcüler sayesinde gazın akış hızı istenilen seviyede sabit tutulmaktadır. Hücre

içerisine giren gaz miktarı milyonda bir (ppm) cinsinden istenilen düzeyde ve yüksek hassasiyette olmak üzere zamana bağlı olarak istenilen zaman aralıklarında açılıp kapanmakta bu esnada ise akım gerilim sistemi ölçüm yapabilmektedir. Program sayesinde bu ölçümlerin akım-zaman grafikleri bilgisayar ekranına eş zamanlı olarak aktarılmaktadır. Ölçümlere başlanmadan önce numuneyi kararlı hale getirebilmek için 30 dakika boyunca hücre içerisine kuru hava gönderildi. Kuru havanın akış hızı, aynı koşullar altında farklı konsantrasyon davranışlarını gözlemleyebilmek için daima sabit tutuldu. Şekil 1'de ölçüm sisteminin şematik diyagramı verildi.



Şekil 1. Ölçüm Sisteminin Şematik Diyagramı (The Schematic Diagram of Measurement Setup)

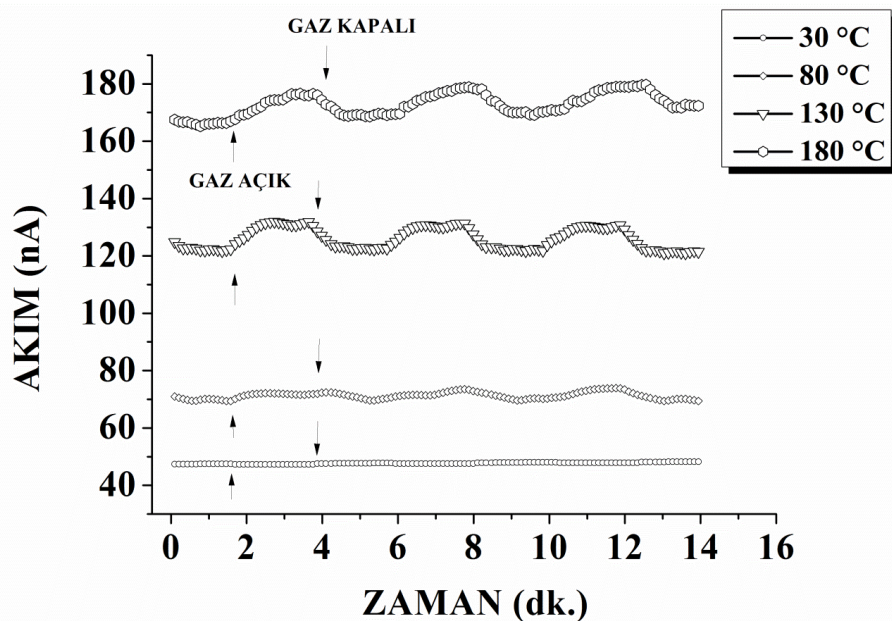
3. SONUÇ VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bir gaz sensörünün çalışma sıcaklığı, sensörün duyarlık tespitindeki başlıca faktörlerden birisidir. Sıcaklığın artırılması yüzey reaksiyonları ve kayda değer bir duyarlık elde etmek için gereklidir [26]. Ancak çok

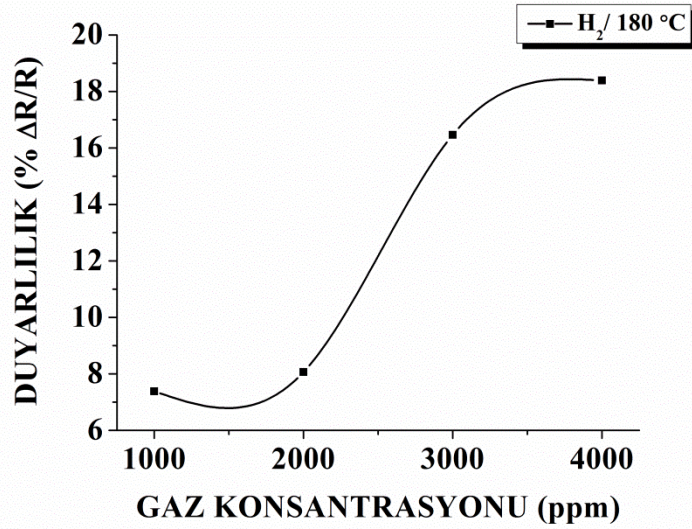
yüksek sıcaklıklar malzeme yapısını bozabilmekte ve sensörün çalışması ile ömrünü etkileyebilmektedir [27]. Bu sebeple gaz algılama özellikleri incelenen sensör malzemelerinin çalışma sıcaklıklarının tespit edilmesi gereklidir. HfO_2 yapısının gaz algılama özelliklerinin incelenmesi için ilk olarak optimum çalışma sıcaklığı tespit edilmesi için 30°C ile 180°C sıcaklık aralığında 1000 ppm H_2 gaz konsantrasyonunda gaz algılama özellikleri incelendi. Şekil 2'de farklı sıcaklıklarda numunenin hidrojen gazına karşı gösterdiği akım-zaman grafiği verildi.

30°C sıcaklıkta numune hidrojen gazına karşı hiçbir değişim gözlenmedi. Ölçüm sıcaklığı 80°C 'ye çıkartıldığında hidrojen gazına bağlı olarak çok küçük değişimler gözlemlendi. 130°C sıcaklıkta numune akımında değişimler gözlenmeye başlanırken, 180°C sıcaklıkta ise kabul edilebilir akım değişimleri gözlemlendi.

Sıcaklığa bağlı duyarlık grafiği şekil 3'te verildi. Sıcaklık arttıkça duyarlık arttı ve 180°C 'de maksimum duyarlık elde edildi. Sıcaklığının artması ile diğer sensör parametrelerinde de iyileşme gözlemlendi. Sıcaklık artışı ile yapıdaki elektronlar enerji kazanmakta ve akım iletimi meydana gelmektedir. Bu yüzden sıcaklık arttıkça duyarlıkta artış gözlenmektedir. Çalışma sıcaklığının etkisi ile kimyasal olarak adsorblanan moleküler oksijen tipi O^- , O^- veya O_2^- şeklinde olup yüzeydeki taşıyıcı elektron sayısını değiştirmektedir [28]. Ayrıca hidrojen gazının algılanmasının ardından akım değerinin başlangıç değere düşmesi, yapının yüzeyinin kuru hava ile yıkanarak yüzeyden hidrojen atomlarının temizlenebilmiş olduğunu gösterdi [29]. Bu nedenle farklı konsantrasyonlardaki dinamik gaz sensör ölçümleri 180°C 'de yapıldı.



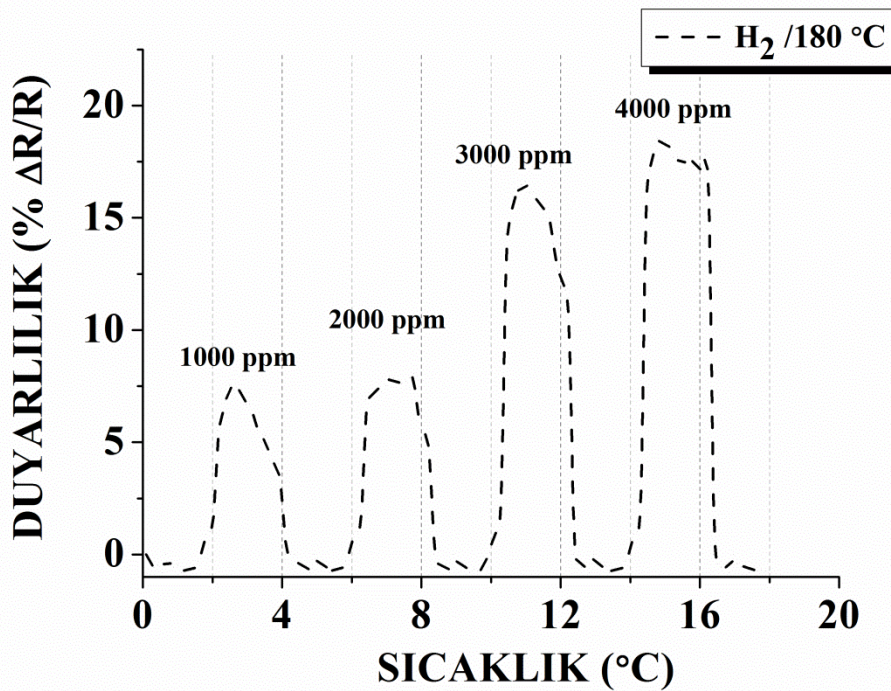
Şekil 2. Farklı Sıcaklıklarda 1000 ppm H_2 gazı için akım-zaman grafiği (Current-Time Graphs for 1000 ppm H_2 gas at different temperatures)



Şekil 3. Farklı sıcaklıklarda 1000 ppm hidrojen gaz konsantrasyonu için duyarlık grafiği (Response graph as a function of operating temperature for 1000 ppm hydrogen gas concentration)

Şekil 4'te numunenin farklı gaz konsantrasyonlarında hidrojen gazına karşı gösterdiği duyarlık-zaman grafiği verildi. 1000 ppm hidrojen gaz konsantrasyonu için duyarlık %7 iken 4000 ppm hidrojen gaz konsantrasyonunda %17'ye yükseldi. Gaz

Kimyasal sensörün gaza karşı etkisi genellikle yüzeydeki algılayıcı film tabakası ile gazın etkileşimine bağlı olduğundan algılayıcı film tabakasının artan yüzey alanı ile sensörün hassasiyet değeri ve tepki hızı gelişecektir. Bununla birlikte sensör özelliklerine



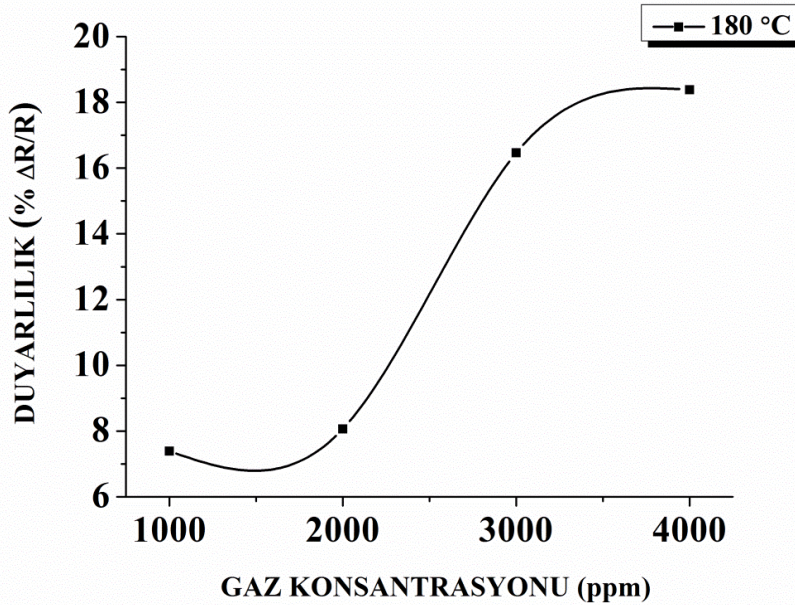
Şekil 4. 180°C'de farklı gaz konsantrasyonları için duyarlık-zaman grafiği (Response-time graphs for different gas concentrations at 180°C)

konsantrasyonu arttıkça duyarlılıkta artış olduğu görüldü. Gaz konsantrasyonu arttıkça daha fazla oksijen molekülü hidrojen gazı ile reaksiyona girmekte ve duyarlılıkta artmaya neden olmaktadır.

partiküllerin boyut dağılımı ve tane sınırları da etki etmektedir [30]. Şekil 5'te ise 180°C'de farklı Gaz konsantrasyonları için duyarlık-gaz konsantrasyonu grafiği verildi. Gaz konsantrasyonu arttıkça duyarlılık

artmakta ve daha çok hidrojen molekülü yüzeye tutunan oksijen molekülleri ile etkileşime girmektedir

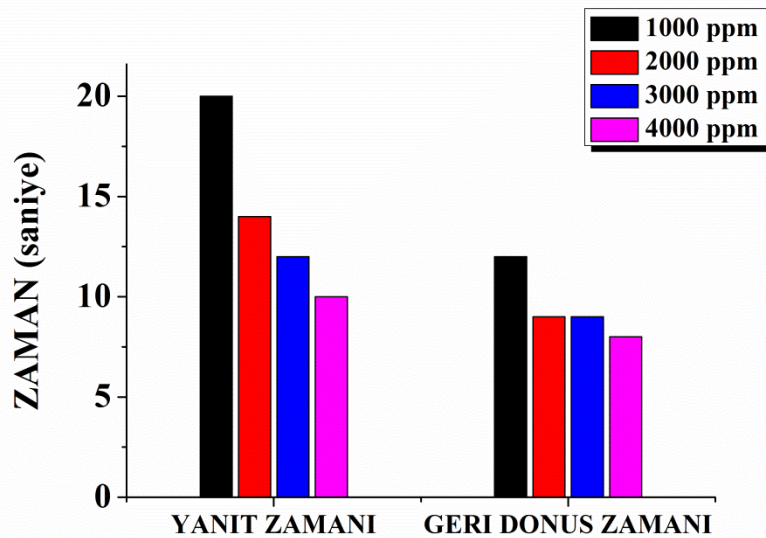
Bütün bu parametreler sensörü karakterize etmek için kullanılırlar. İdeal bir sensör, yüksek duyarlık, dinamik



Şekil 5. 180°C'de duyarlık-gaz konsantrasyonu grafiği (Response-gas concentrations graphs at 180°C)

Yanıt ve geri dönüş zamanları gaz algılama uygulamalarının temel parametrelerindendir [31]. Şekil 6'da farklı gaz konsantrasyonları için yanıt ve geri dönüş zamanları verildi. Grafikten açıkça görülmektedir ki numunenin algılama ve geri dönüş mekanizmaları oldukça hızlıdır ve artan konsantrasyonla zaman azalmaktadır. Bu numunenin hidrojen gazını hızlı bir şekilde algılayabildiğinin bir göstergesidir. Numunenin duyarlılığının, sıcaklık ve gaz konsantrasyonuna bağlı olarak değiştiği açıkça görülmektedir.

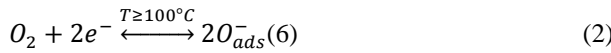
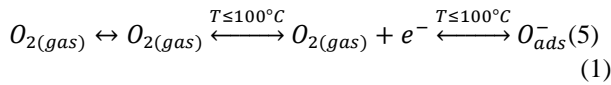
algılama aralığı, seçicilik ve stabilite, tepki süresi ile uzun bir ömüre sahip olmalıdır [32]. Ancak sensörlerin kullanım alanlarına ve uygulama alanlarına bağlı olarak bu özelliklerin tamamına ihtiyaç duyulmaz. Genellikle uygulama alanına göre bu özelliklerden bir kısmı seçilir ve onların iyileştirilmesi üzerinde durulur. Örneğin endüstri alanında kullanılan bir gaz sensörünün milyarda bir (ppb) seviyesinde bir hassasiyete sahip olması gerekmezken, ondan beklenen asıl özellik tepki süresinin saniyeler mertebesinde kısa olmasıdır. Çevre



Şekil 6. Farklı gaz konsantrasyonları için yanıt ve geri dönüş zamanları (Response and recovery times for different gas concentrations)

uygulamalarında kullanılan gaz sensörleri, gaz konsantrasyonlarının değişimine göre daha uzun sürdüğü için düşük tepki süresine sahip olmaları beklenmez ve dakikalarla ölçülebilecek bir tepki süresi makul görünürken, dedeksiyon limitinin düşük olması istenecektir. Sağlık uygulamalarında kullanılan sensörlerin hastalık tayinlerinde kullanılmalarından dolayı duyarlıklarının yüksek ve dedeksiyon limitlerinin de çok düşük olması gerekmektedir [33-35]. Hidrojen gazı yüksek patlama değerine sahip olduğu için hızlı yanıt ve geri dönüş zamanlarına ihtiyaç vardır [36]. Bu çalışmada üretilen numunenin hidrojen gazı algılama ve geri dönüş zamanlarının oldukça hızlı olduğu görülmektedir.

Metal-okisit-yarıiletken gaz sensörleri, hedef gaz ile sensör yüzeyindeki etkileşimleri ile tanımlanırlar. Daha iyi bir yüzey alanı oluşturulması, daha güçlü etkileşimlerin olmasını sağlayarak daha yüksek duyarlılık elde edilmesini sağlayacaktır [37]. Temel algılama prensibi yüzey ile gaz molekülü arasındaki yük alışverişine dayalıdır. Elektronlar iletkenlik bandından adsorbe edilmiş oksijenlere transfer olurlar. Bunun sonucunda yüzeye oksijen tutunur ve bu bir yük azalma bölgesi (uzay yük bölgesi) oluşturur. Bu azalma bölgesi iletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğuna ve oksijen moleküllerinin sayısına bağlıdır. Oksijen yarıiletken için bir yüzey tuzağıdır. Oksijenin yüzeye tutunma reaksiyonu aşağıdaki gibidir [28]:



İndirgeyici bir gaz, potansiyel engelinde (tanecikler arasında) bir azalma meydana getirir. O⁻ iyonları, gönderilen gaz ile reaksiyona girerek elektriksel dirençte bir değişim meydana getirir [28]. Hidrojen molekülleri, oksijen molekülleri ile reaksiyona girerek ortama elektron salar. Reaksiyon aşağıdaki gibidir [29].



Capone ve ark., katılanmamış saf HfO₂ yapıların n tipi özellik sergilediğini rapor etmişlerdir [38]. Böylelikle ortamdaki taşıyıcı konsantrasyonundaki (elektron artışı) artışa ek olarak tanecikler arasındaki enerji bariyer yüksekliğini azaltmakta böylelikle daha yüksek duyarlıklar elde edilmesine yol açmaktadır. Sıcaklık arttıkça hidrojen molekülleri ile oksijen molekülleri arasındaki reaksiyon hızlanmakta ve daha yüksek duyarlıklar elde edilmesine neden olmaktadır. Grafiklerden açıkça görülmektedir ki gaz sensörünün duyarlılığı, sıcaklık ve gaz konsantrasyonu ile değişmektedir. Ancak çok yüksek sıcaklıklar malzemenin yüzeyini bozmakta ve yüksek güç tüketimine yol açmaktadır. İstenilen duyarlılık ve seçiciliğin sağlanması, algılayıcı malzemenin seçimi ve üretim yöntemlerine de bağlı olarak değişim gösterebilmektedir [39].

4. SONUÇLAR(CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, ALD metodu ile HfO₂/p-Si yapısı üretilmiş ve hidrojen gazına karşı gaz algılama özellikleri araştırıldı. Üretilen numunenin farklı sıcaklıklarda (30°C-180°C) sabit 1000 ppm hidrojen gazına karşı ölçümleri alındı. 180°C’de maksimum duyarlılık elde edildi. 180°C’de 1000ppm’den 4000 ppm’ farklı hidrojen gaz konsantrasyonlarında ölçümler alındı ve 4000 ppm hidrojen gazı için maksimum duyarlılık gözlemlendi. Numunenin algılama hızları ve geri dönüş mekanizmaları da oldukça hızlı oldu. Ayrıca hidrojen gazının algılanmasının ardından akım değerinin başlangıç değere düşmesi, yapının yüzeyinin kuru hava ile yıkanarak yüzeyden hidrojen atomlarının temizlenebilmiş olduğunu gösterdi. Elde edilen bulgulardan, ALD metodu ile üretilen HfO₂ metal oksit malzemelerin düşük sıcaklık gaz sensörü uygulamalarında kullanılabileceği görüldü.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK 114F074 kodlu proje ve Gazi Üniversitesi BAP 05/2015-02 kodlu proje tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Çolak Z., ‘Anodik Oksidasyon Yöntemi İle Üretilen Titanyum Oksit Nanotüplerin Hidrojen Algılama Özelliklerinin İncelenmesi’, *Yüksek Lisans Tezi*, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, (2008)
- [2] Erman C., ‘Hidrojenin Ek Yakıt Olarak Kullanılmasının Dizel Motora Etkilerinin İncelenmesi’, *Yüksek Lisans Tezi*, Hacettepe Üniversitesi, (2007)
- [3] Solmaz R., ‘Hidrojen Gazı Eldesi ve Metanol Elektrokimyasal Reaksiyonu İçin Katalitik Elektrot Geliştirilmesi’, *Doktora Tezi*, Çukurova Üniversitesi, Adana, (2009)
- [4] Choudhuri A.R., ‘Investigation on the Flame Extinction Limit of Fuel Blends’, *Combustion and Propulsion Research Laboratory*, the University of Texas at El Paso, USA, (2005)
- [5] McCarty R.D., Hord J., Roder H.M., ‘Selected Properties of Hydrogen (Engineering Design Data)’ *National Bureau of Standards Monograph 168*, US Government Printing Office, Washington, (1981)
- [6] Kuznetsov M., ‘Effect of Pressure and Temperature on Flame Acceleration and DDT Limits for Methane-Air Mixtures’, *Proc. European Combustion Meeting (ECM2005)*, April 3-6, (2005)
- [7] Lv Y., Zhang B., Wu Y., ‘Effect of Ni content on microstructural evolution and hydrogen storage properties of Mg_{1-x}Ni₃La (x = 5, 10, 15, 20 at.%) alloys’, *J. Alloys Comp.* 641: 176–180, (2015)
- [8] Prezhdo V.V., Vashchenko E.V., Prezhdo O.V., Pushko A., ‘Structure and properties of hydrogen bonded complexes of pyridine-N-oxide and its derivatives’, *J. Mol. Struct.* 510: 69–83, (1999)
- [9] Licznarski B.W., Nitsch K., Teterycz H., Wisniewski K., ‘The influence of Rh surface doping on anomalous

- properties of thick-film SnO₂ gas sensors', *Sens. Actuators B* 79: 157–162, (2001)
- [10] Al-Kuhaili M.F., Durrani S.M.A., Bakhtiari I.A., 'Carbon monoxide gas-sensing properties of CeO₂-ZnO thin films', *Appl. Surf. Sci.*, 22(5): 3033–3039, (2008)
- [11] Phanichphant S., 'Semiconductor Metal Oxides as Hydrogen Gas Sensors', *Procedia Engineering* 87: 795 – 802, (2014)
- [12] Adamyan A.Z., Adamyan Z.N., Aroutiounian V.M., Arakelyan A.H., Touryan K.J., Turner J.A., 'Sol-gel derived thin-film semiconductor hydrogen gas sensor', *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 4101 – 4108, (2007)
- [13] Steinebach H., Kannan S., Rieth L., Solzbacher F., 'H₂ gas sensor performance of NiO at high temperatures in gas mixtures', *Sens. Actuators B*, 162–168, (2010)
- [14] Karaduman I., Yıldız D.E., Sincar M.M., Acar S., 'UV light activated gas sensor for NO₂ detection', *Mater. Sci. Semi. Processing*, 28: 43-47, (2014)
- [15] Blauw A. M., Van Anh T.D., Calama M.C., Brongersma S.H., 'Metal Oxide ALD Films for Low Power Sensor Applications', *ECS Trans.* 50(13): 137-140, (2013)
- [16] Karaduman I., Demir M., Yıldız D.E., Acar S., 'CO₂ gas detection properties of a TiO₂/Al₂O₃ heterostructure under UV light irradiation', *Physica Scripta* 90(5): 055802, (2015)
- [17] Pinna N., Knez M., 'Atomic Layer Deposition of Nanostructured Materials', *WILEY*, 41-51, (2012)
- [18] Hwang C.S., Yoo C.Y., 'Atomic Layer Deposition for Semiconductors', *Springer*, 15-47, (2014)
- [19] Kääriäinen T., Cameron D., Kääriäinen M.L., Sherman A., 'Atomic Layer Deposition', *WILEY*, (2013)
- [20] Moon S.E., Lee H.K., Choi N.J., Kang H.T., Lee J., Ahn S.D., Kang S.Y., 'Low power consumption micro C₂H₅OH gas sensor based on micro-heater and ink jetting technique', *Sens. Actuators B*, 217: 146–150, (2015)
- [21] Demir M., Barin Ö., Karaduman I., Yıldız D.E., Acar S., 'Low Concentration of CO Gas Sensor by Atomic Layer Deposition', *Journal of Physical Science and Application* 4 (8): 488-492, (2014)
- [22] Kukli K., Ritala M., Sajavaara T., Keinonen J., Leskela M., 'Atomic Layer Deposition of Hafnium Dioxide Films From Hafnium Tetrakis(ethylmethanamide) and water', *Chem. Vap. Deposition* 8:5, 199-204, (2002)
- [23] Martinez F.L., Toledano-Luque M., Carabe J., Bohne W., Rohrich J., Strub E., Martil I., 'Optical properties and structure of HfO₂ thin films grown by high pressure reactive sputtering', *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40: 5256–5265, (2007)
- [24] Gao J., He G., Zhang J.W., Deng B., Liu Y.M., 'Annealing temperature modulated interfacial chemistry and electrical characteristics of sputtering-derived HfO₂/Si gate stack', *J. Alloys and Compounds* 647: 322-330, (2015)
- [25] Bennett N.S., Cherkaoui K., Wong C.S., O'Connor É., Monaghan S., Hurley P., Chauhan L., McNally P.J., 'Structural and optical properties of post-annealed atomic-layer-deposited HfO₂ thin films on GaAs', *Thin Solid Films* 569: 104–112, (2014)
- [26] Choi G., Satyanarayana L., Park J., 'Effect of process parameters on surface morphology and characterization of PE-ALD SnO₂ thin films for gas sensing', *App. Surf. Science* 252: 7878–7883, (2006)
- [27] Wang C., Yin L., Zhang L., Xiang D., Gao R., 'Metal Oxide Gas Sensors: Sensitivity and Influencing Factors', *Sensors* 10: 2088-2106, (2010)
- [28] Geistlinger H., 'Accumulation layer model for Ga₂O₃ thin-film gas sensors based on the volkenstein theory of catalysis' *Sens. Actuators B* 18-19: 125–31, (1994)
- [29] Soleimanpour A. M., Khare S.V., Jayatissa A.H., 'Enhancement of Hydrogen Gas Sensing of Nanocrystalline Nickel Oxide by Pulsed-Laser Irradiation', *ACS Appl. Mater. Interfaces* 4: 4651–4657, (2012)
- [30] Gu H., Wang Z., Hu Y., 'Hydrogen Gas Sensors Based on Semiconductor Oxide Nanostructures', *Sensors* 12: 5517-5550, (2012)
- [31] Lima Y.T., Sonb J.Y., Rhee J.-S 'Vertical ZnO nanorod array as an effective hydrogen gas sensor' *Ceramics International* 39: 887–890, (2013)
- [32] Babaei M., Alizadeh N., 'Methanol selective gas sensor based on nano-structured conducting polypyrrole prepared by electrochemically on interdigital electrodes for biodiesel analysis', *Sens. Actuators B* 183: 617–626, (2013)
- [33] Patil D.R., Patil L.A., Amalnerkar D.P., 'Ethanol Gas Sensing Properties of Al₂O₃-doped ZnO Thick Film Resistor', *Bull. Mater. Sci.*, 30:6, 553-559, (2007)
- [34] Korotcenkova G., Cho B.K., 'Instability of metal oxide-based conductometric gas sensors and approaches to stability improvement (short survey)', *Sens. Actuators B* 156: 527–538, (2011)
- [35] Durrani S.M.A., 'CO-sensing properties of hafnium oxide thin films prepared by electron beam evaporation', *Sens. Actuators B* 120: 700–705, (2007)
- [36] Villatoro J., Luna-Moreno D., Monzon-Hernandez D., 'Optical fiber hydrogen sensor for concentrations below the lower explosive limit', *Sens. Actuators B*, 110: 23–27, (2005)
- [37] Lyson-Sypien B., 'Nanopowders of chromium doped TiO₂ for gas sensors' *Sens. Actuators B* 175: 163–72, (2012)
- [38] Capone S., Leo G., Rella R., Siciliano P., Vasanelli L., 'Physical characterization of hafnium oxide thin films and their application as gas sensing devices' *J. Vac. Sci. Technol. A* 16:6, (1998)
- [39] Gupta R.B., 'Hydrogen Fuel Production, Transport, and Storage', *CRC Press*, 495-5, (2008)

Mühendislik Bakış Açısıyla Cerrahi Robot Teknolojisinde Mevcut Durum Ve Beklentiler: Literatür Taraması

Süleyman TAŞGETİREN¹, Mehmet YALVAÇ², Özgür VERİM³

¹Bursa Orhangazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilgi İşlem Daire Başkanlığı, Afyonkarahisar

³Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

(Geliş / Received : 07.07.2015 ; Kabul / Accepted : 24.10.2015)

ÖZ

1980'li yıllardan başlayarak endüstriyel robotikte sağlanan gelişmelerin cerrahi alanına da yaygınlaştırma çalışmaları hızlı bir artış göstermiştir. Ticari hale gelmiş robot sayısı sınırlı olmakla birlikte günümüzde çok çeşitli amaçlara yönelik cerrahi robot geliştirme çalışmaları yürütülmektedir. Konunun cerrahi açıdan değerlendirmesi üzerinde hekimler tarafından çok sayıda çalışma yürütülmektedir. Cerrahi robotların mühendislik tarafında ise yapılması gereken daha bir çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada cerrahi robotlar üzerinde yürütülen mühendislik çalışmaları tarihsel süreç içinde ele alınmış, gelecek çalışmalara ışık tutulmaya gayret edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Cerrahi robotik, mühendislik, teknolojik gelişmeler

State of the Art and Expectations in the Surgical Robotics Technology from the Engineering Point of View: A Literature Review

ABSTRACT

Starting from 1980s, there is a rapid increase in the amount of studies for the extension of achievements in the industrial robotics to surgical field. Although a limited number of robots have become commercial to date, surgical robot development studies are carried out for various purposes. The assessment of the subject in surgical aspects is conducted by physicians. On the other hand, in the engineering side there are a lot more work to be done on the surgical robots. In this study, engineering studies conducted on surgical robots were discussed in the historical process and it is tried to shed a light on the future works.

Keywords: Surgical robotics, Engineering, technological achievement

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sağladığı kolaylıklar nedeniyle, bilgisayar destekli sistemler her geçen gün insan hayatında daha fazla yer almaktadır. Bilgisayar destekli tasarım, üretim, eğitim gibi kavramlar uzun yıllardır kullanılmakta, bu kavramlar çerçevesinde geliştirilen sistemler de yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Cerrahi alanında bilgisayar desteğinin kullanımı önceleri bilgisayarla bütünleşik cerrahi (computer integrated surgery- CIS) ve bilgisayar destekli cerrahi (computer aided surgery-CAS) olarak kullanılmaya başlanmış, daha sonra medikal robotik veya robotik manipülatör adıyla yaygınlaşmıştır [1-19].

Son zamanlarda Avrupa Endoskopik Cerrahlar Birliği (EAES) tarafından yayınlanan genel "cerrahide robot kullanımı konusundaki mutabakat metni" nin girişinde çekimsellik ifade edecek bir üslup tercih edildiği

görülmektedir. "Ameliyathanede ileri teknoloji uygulamaları yeni olmasa da, cerrahi robotların operasyon odalarında yer alması ile ilgili kabul süreçleri diğer teknolojik araçların kabul edilmesine göre bazı farklılıklar içermektedir. Şu anda ticari olarak cerrahi robot üreten ve pazarlayan tek hâkim şirket bulunmaktadır. Bu robotların hem satın alma hem de işletme maliyetleri birçok hastane için hala oldukça yüksek bulunmaktadır. Bundan başka, yüksek maliyet paydaşların karar mekanizmalarında önemli bir baskı oluşturmada ve prostatektomi ameliyatları gibi bazı özel durumlarda maliyeti karşılama endişesiyle gereğinden fazla kullanım gibi sonuçlar doğurmaktadır. Cerrahi yöntemin gerekliliği yanında, bu işlemin robotik cerrahi ile yapılması gerekip gerekmediği konularında hastaların iyi bir şekilde bilgilendirilmesi ve olabilecek alternatif tedavi yöntemleri hakkında aydınlatılmaları önem arz etmektedir. Robotik cerrahi, mutlaka somut delillere dayalı olarak uygulanmalıdır [20]."

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: tasgetiren@aku.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 231-244

Cerrahi alanında bilgisayarla bütünleşik sistemler, bilgisayar destekli ameliyat ya da medikal robotik olarak adlandırılan sistemlerin kullanımı 1980'li yıllarda başlamıştır [21-29]. Bu çalışmalarını takiben, bu alandaki çalışmalar hızlı bir artış göstermiştir. Taylor yaptığı 250'nin üzerindeki çalışmasıyla bilgisayarların cerrahi alanındaki kullanımının başlangıçtan beri öncüsü ve bu alandaki terminolojiyi oluşturan araştırmacı olmuştur [9]. Mart 2015 tarihinde Scopus veri tabanında "robotics" ve "surgery" kelimeleriyle yapılan taramada 15870 adet yayın bulunmuştur. Bu yayınların beşer yıllık aralıklara göre dağılımı Şekil 1'de verilmiştir. Şekilde ayrıca yayınlar içinden mühendislik alanlarında yapılanlar ayrılmış olarak da verilmiştir. Aynı şekilde bu alandaki Türkiye adresli yayınlar da gösterilmiştir.

Şekilden görüldüğü gibi, başlangıçta mühendislik ve sağlık alanındaki yayınlar başa baş seyredirken, ortaya konan cerrahi sistemlerin yaygınlık kazanmaya başladığı 1990'lı yıllardan itibaren sağlık alanındaki yayınlar hızla artmış, mühendislik alanındaki artış ise daha sınırlı kalmıştır. Bu alandaki Türkiye adresli yayınların toplamı 189 olup, ilk yayınlar 2000'li yıllardan itibaren görülmekte ve daha ziyade sağlık alanındaki çalışmaları içermektedir. Robot sistemlerinin tasarım ve üretimini içeren araştırma çalışmalarının yer aldığı mühendislik alanındaki çalışmalar ise daha sonra görülmeye başlanmış (2005 yılından itibaren) ve çok daha sınırlı oranda kalmıştır [31-37].

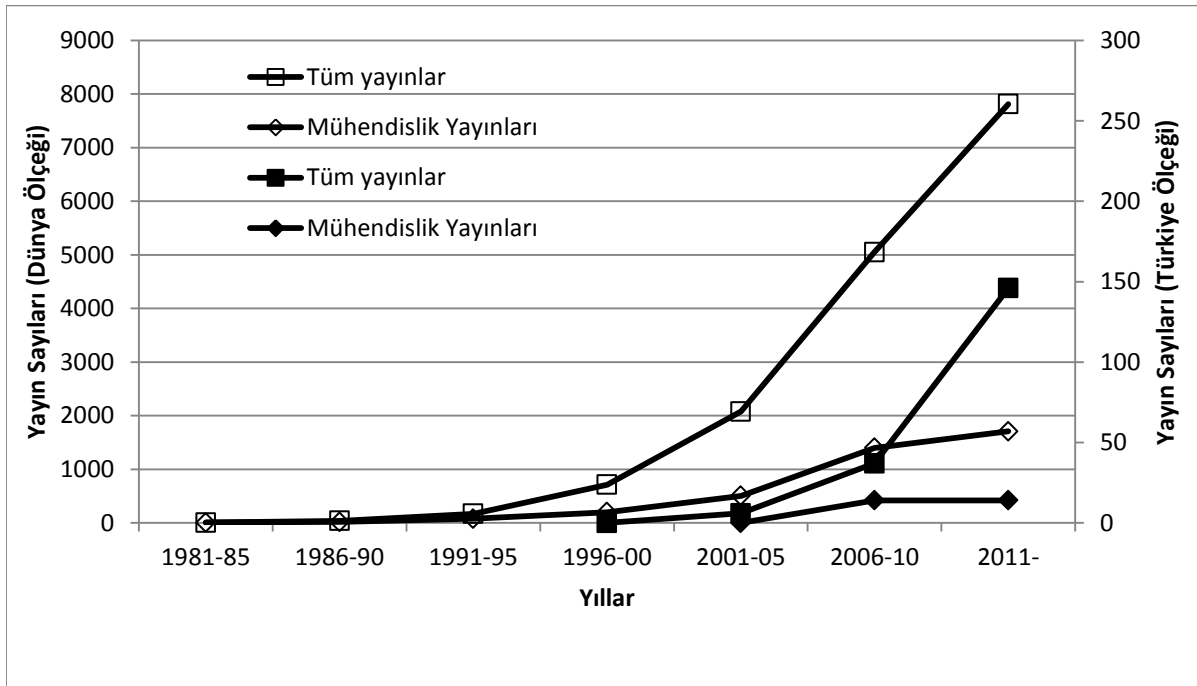
2. CERRAHİ CAD/CAM (SURGICAL CAD/CAM)

Cerrahi alanda bilgisayar desteği genellikle operasyon öncesi, operasyon esnasında ve operasyon sonrası bilgisayar desteği sağlanan aşamalardan meydana gelir.

Operasyon öncesinde hastaya ait 2 veya 3 boyutlu görüntüler elde edilir ve bunlar hastanın diğer bilgileriyle birlikte cerrah tarafından değerlendirilir [38-54]. Bu kapsamda hastanın durumuna yönelik olarak gerek yumuşak gerekse sert dokuya yönelik değerlendirmeler yapılabilir. Karaciğer bir örnek olarak alınır, burada bulunan lezyonun büyüklüğü ve pozisyonu, karaciğerdeki diğer anatomik yapılarla olan ilişkileri ve karaciğerin bir kısmının alınması durumunda kalan kısmın hacminin hesaplanması vb hususlar operasyon öncesi bilgisayar desteği için önemli noktadır [55-69]. Sert doku açısından ise kırık kemiklerin stabilizasyonu, levha kullanımı durumunda levhanın kemik anatomisine uygun eğriliğe sahip olması, uygun matkap ve buna bağlı vida açılarının belirlenmesi ve gerekli kılavuzların hazırlanması noktalarında bilgisayar desteğinden yararlanılabilir [70].

Ameliyat esnasındaki bilgisayar desteği ise başlangıçta planlanan operasyondaki doğruluğun denetimi ve gerekli ise operasyon planının sürekli güncellenmesi açısından önemlidir. Operasyon esnasında bazı aşamaların doğrudan robot tarafından gerçekleştirilmesi de söz konusu olabilir. Bilgisayar desteği, ameliyat sonrası yapılacak değerlendirmeler için sürekli kayıt olarak envanter oluşturma açısından da önem kazanmaktadır. Bu sayede gerekli istatistiksel değerlendirmeler ve daha sonraki operasyonlar için kullanılacak deneyimler doğrudan kayıt altına alınmış olur.

Cerrahi operasyon etkileşimli bir işlem olup birçok karar işlem sırasında alınır. Cerrahi robotiğin amacı, cerrahın yerini bir robotun alması değildir. Ancak operasyon sırasında cerraha operasyonu



Şekil 1. Robotik cerrahi alanında yapılan uluslararası yayınların yıllara göre değişimi (Variation of number of international publications in the field of robotic surgery)

gerçekleştirmesi için oldukça önemli yardımcı araçlar sağlama açısından cerrahi robotikten yararlanılmaktadır. Bu kapsamda kullanılacak önemli yardımcı araçlardan biri uzaktan müdahale araçlarıdır. Bu amaçlar için kullanılan yardımcı araçlardan biri doğrudan cerrah tarafından kullanılan ve cerrahın operasyon noktasına ulaşmasını sağlayan uzatma araçlarıdır. Bu araçlar cerrahın operasyon kabiliyetini artırarak ve cerrahın kaynaklanabilecek el titremesi gibi istenmeyen hareketleri hastaya yansıtmayarak yardımcı olmaktadır.

Robotik cerrahinin sağladığı en önemli avantajlardan biri uygun ergonomik yapısı nedeniyle cerrahın iş yükünü azaltarak fiziksel veya zihinsel yorgunlukta azalmaya katkı sağlamasıdır. Ancak yardımcı personelin iş yükünde kayda değer bir azalma görülmemektedir [71-75]. Bu araçların yararlılığı başka şekilde tedavi edilmeyen olaylara müdahale imkânı vermesi, hata oranlarında azalma sağlanması ve operasyon süresinde kısımla sağlanmasına bağlı olarak değerlendirilir.

Diğer yardımcı araç grubu ise cerrahi destek araçlarıdır. Bu araçlar cerrahın hemen yanında kullanılır ve endoskop tutucu olarak veya retraksiyon gibi işlemler için kullanılır. Bu tipteki araçlar joystick, sesle kontrol veya cerrahın baş hareketlerinin izlenmesi gibi kontrol araçlarından biri ile kullanılır [22, 75-82]. Bu araçları daha akıllı hale getirmek daha fazla otomatik hareket yapmalarını sağlamak için çalışmalar yapılmaktadır. Bu sayede, cerrahın dikkatini daha az dağıtarak endoskopun doğrudan istenen anatomik noktaya hedeflenmesi veya cerrah tarafından kullanılan bir cerrahi aleti takip edecek şekilde yapılmaları sağlanabilmektedir (Şekil 2). Bunların değeri de uzaktan müdahale araçlarında olduğu gibi belirlenmekte, ayrıca operasyonun etkinliği de önemli bir kriter olarak değerlendirilmektedir [83-93].



Şekil 2. Robotun kontrolü için kullanılan bir master sistemi (A master system for the control of surgical robot)

2. CERRAHİ ROBOTLARDA KULLANILAN TEKNOLOJİ VE TASARIM PARAMETRELERİ (TECHNOLOGY AND DESIGN PARAMETERS USED IN THE SURGICAL ROBOTS)

Başlangıçta cerrahi robotlarda endüstriyel robotlarda kullanılan sistemler az bir değişiklikle kullanılmaya başlanmıştır [23, 24, 94]. Daha sonraları da başlangıç düzeyindeki çalışmalarda konsantrasyonu sistemin

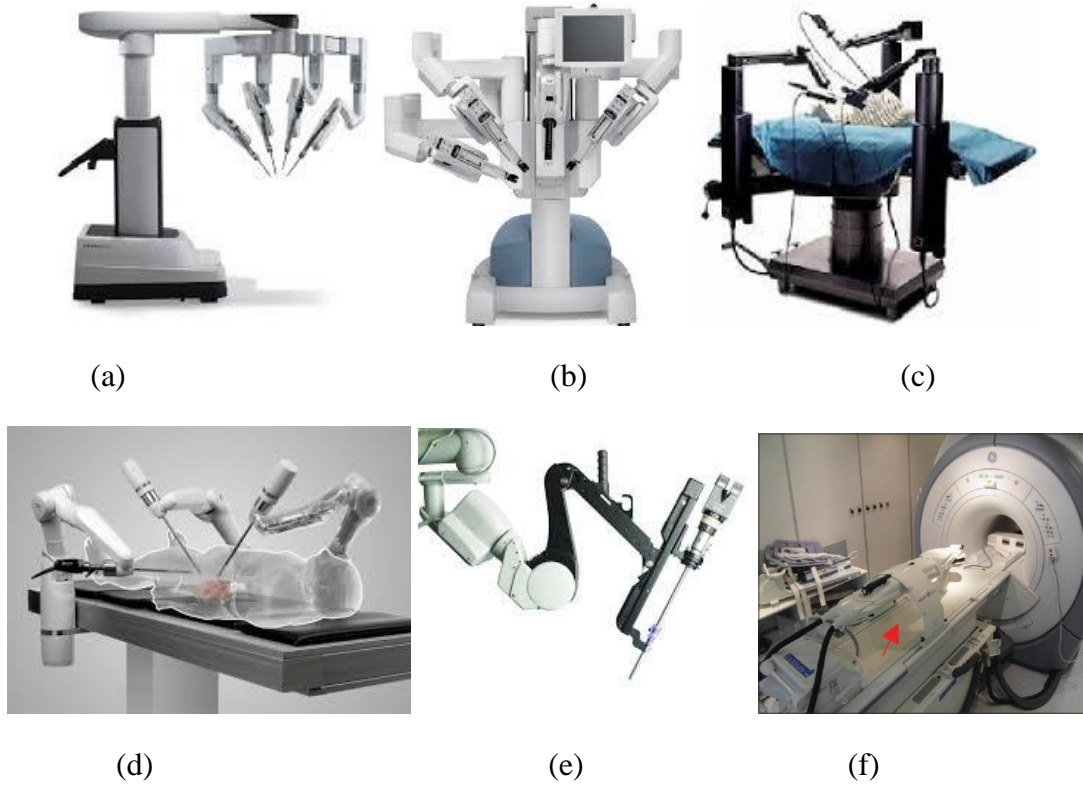
kinematiğine vermek istemeyen araştırmacılar tarafından endüstriyel robotlar kullanılabilir [38, 95-97].

Cerrahi robotların operasyon odasına uygun bir yapıda olması gerekmektedir. Yeterli mukavemete, rijitliğe ve kullanım amacı için gerekli hareket kabiliyetine sahip olması gerekir. Robotun operasyon odasında hasta vücudunda çalışma yapılacak noktaya ulaşabilecek şekilde yerleştirilmesi gerekmele birlikte odadaki sağlık görevlilerinin hareketlerini engellemeyecek bir yapıda olması da gerekmektedir. Bu amaçla robot operasyon masası üzerine monte edilebildiği gibi [98, 99], hastanın arka tarafına zemine veya tavana monte edilenleri de vardır [100-108] (Şekil 3). 2010 yılından başlayarak elle taşınabilen cerrahi robotlar konusunda da artan bir hızla çalışmaları yapıldığı görülmektedir [2, 109-114].

Robotun hasta ile temas edilen kısımları ile ameliyat odasında kontaminasyona neden olabilecek kısımlarının sterilize edilmesi veya steril malzemelerle kaplanması gerekir. En yaygın kullanılan yöntem robot gövdesinin önceden sterilize edilmiş malzemelerle kaplanması, end efektör ve bunu gövdeye bağlayan taşıyıcıların ise sterilize edilmesidir [115]. End efektörün motor veya sensörle donatılmış olduğu durumlarda gaz ortamda bulundurma veya sıvıya batırma şeklindeki sterilizasyon kullanılırken bu alanda da otoklavda sterilizasyona yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Şekil 4).

Kullanılan görüntü yönlendirme sistemleri olabildiğince küçük yapıma gereklerinin yanı sıra görüntünün netliği ve görüntüleme cihazları yardımıyla kontrol edilmeleri açısından da bazı önemli tasarım sınırlandırmaları içermektedir. 3B görüntülemenin 2B görüntülemeye göre avantajlarını değerlendiren çalışmalar çelişkili sonuçlar vermiştir. 3B görüntülemenin cerrahın becerisinde % 10-15'lik bir artış sağladığını gösteren çalışmalar bulunmaktadır. Buna ek olarak, 3B görüntüleme cerrahın becerisine bağlı hata oranlarında önemli azalmalar sağlayabilmektedir. MR cihazlarının robotlarla birlikte kullanılmaları durumunda ise ortaya çıkan manyetik alan nedeniyle ferromanyetik malzemelerin kullanımında önemli sorunlar ortaya çıkmaktadır [115-121]. Ayrıca MR cihazlarındaki elektrik akımıyla robotik yardımcı sistemlerin kullandığı elektrik arasında girişim ve aşırı ısınma sorunları da ortaya çıkabilmektedir.

Tüm mühendislik alanlarında olduğu gibi güvenlik faktörü, tıbbi robotik alanında da önemli bir faktördür. Tüm tasarım, üretim ve kullanım aşamalarını içerecek şekilde güvenlik faktörünün göz önünde bulundurulması gereklidir [122-129]. Bu nedenle robotik sistemin tüm parçalarının hız sınırlarının doğru belirlenmesi, aktüatörlerde gereğinden fazla güç kullanılmaması, elektronik ve mekanik parçaların yerleşimi konusunda titizlik, acil stop düğmelerinin doğru belirlenmesi, kontrol ve yeniden başlatma aşamalarının iyi planlanması, tasarım ve test aşamalarının doğru dokümantasyonu gibi hususlar tasarım ve prototip



Şekil 3. Operasyon masasına göre robot pozisyonları a) Tek koldan dağılan çok kollu hareketli sistem, b) Gövdeden dağılan çok kollu hareketli sistem, c-d) Operasyon masasına monte edilen sistemi e) tavana monte edilen tek kollu sistem f) MR cihazına monte edilen sistem (*Position of the robot with respect to operation table a) A multiple arm mobile system from single arm, b) Mobile system with multiple arm from the body c-d) Systems mounted on the operation table, e) A ceiling mounted system, f) A system mounted on an MRI device*)

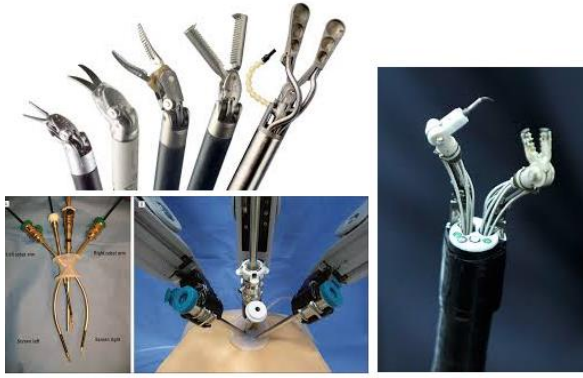
geliştirme çalışmalarında üzerinde önemle durulması gereken konulardır [130-144].



Şekil 4. Robotik sistemde sterilizasyon örneği (*Examples of sterilisation used in yhe robotic surgery*)

Tıbbi robot sistemlerinde göz önünde bulundurulması gereken önemli faktörlerden biri de, robot sisteminin genel amaçlı mı yoksa sadece bir fonksiyonu yerine getirmek için mi tasarlanacağıdır. Genel amaçlı robotlar için söz konusu olan önemli kısıtlayıcılardan birisi sistemin kullanımı için ilgili otoritelerden izin alma noktasındaki zorluklardır. Tasarlanan robotik sistemin bir çok end efektörün takılmasına imkân sağlayacak şekilde yapılması önem arz etmektedir [145-151]. Ancak, sadece belirli fonksiyonları yerine getirmek amacıyla geliştirilmiş sistemlerin kullanımı da mümkündür [71, 152-189]. Pasif olarak yönlendirilebilen robot kolları kılavuz amaçlı kullanım için yeterli olabilmektedir [190-197] (Şekil 5).

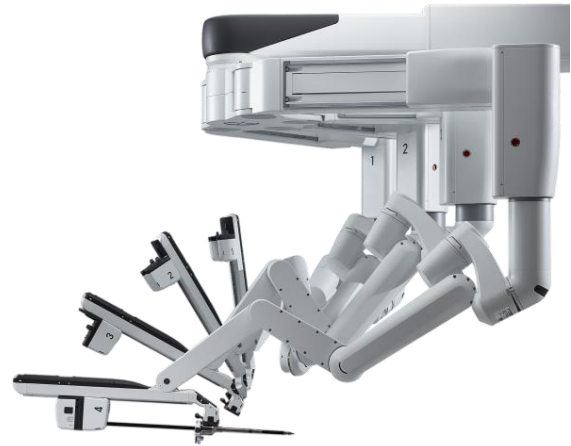
Önemli bir tasarım yaklaşımı da robotik sistemin modüler olarak tasarlanmasıdır. Bu sistemde bilgisayar ve ona bağlı robot ana gövdesi standart olarak tasarlanırken, farklı amaçlar için değiştirilmiş kol ve benzeri üniteler robot üzerine daha sonradan monte edilip çıkarılabilecek şekilde yapılabilir.



Şekil 5. Robotik cerrahi için geliştirilmiş çeşitli end efektör tipleri (*Some end-effector types developed for robotic surgery*)

Cerrahi operasyonların büyük bir çoğunluğu bir nokta etrafında yapılan büyük açısal hareketlerle gerçekleştirilmektedir. Laparoskopik cerrahide sabit nokta end efektörün vücuda girdiği noktadır (Şekil 6). Perkütan operasyonda ise iğne ucu deri üzerinde bir noktayı işaretlemekte, daha sonraki yönlendirme işlemi bu noktadan yapılmaktadır. Açık mikro cerrahi işlemlerinde kullanılan cerrahi aletin ucu çok küçük hareketler yaparken, aletin diğer kısımları büyük açısal hareketler yapabilmektedir. Yüz ve çene cerrahisinde de buna benzer şekilde çok küçük hareketlerle kemik üzerinde işlem yapmayı gerektirmektedir. Buna bağlı olarak, robotun operasyonlarda kullanılan uzuvlarının robot gövdesinden ayrı olarak tasarlanması gerekmektedir. Bu sayede robotun ana gövdesi sadece öteleme hareketlerini yaparken, açısal hareketler kollar ve end efektörler yardımıyla gerçekleştirilebilir. Yine bu sayede robotun gövdesi bir noktada sabitlenerek operasyon sırasında öteleme hareketleri yapması engellenmiş olur [81, 198-201].

Robot manipülatörünün hedef noktasına herhangi bir yönden yaklaşabilmesi için insan el-kol kinematiklerinde olduğu gibi en az 6 serbestlik derecesine sahip olması gerekmektedir. İnsan el-kol kinematik sistemini taklit ederek yapılacak bir cerrahi robotik sistem omuz ekleminde iki serbestlik derecesine, dirsek ekleminde iki serbestlik derecesine ve bilek ekleminde iki serbestlik derecesine sahip olmalıdır. Yedinci serbestlik derecesi forseps veya makas çenelerin açılış ve kapanış hareketini yapmak üzere kabul edilebilir. Mevcut robotik sistemlere bakıldığında; açılı hareket eden kollar [27, 202-204], paralelogram ve 4 kol mekanizmaları [39, 205-207] zincir ve kayış mekanizmaları [75, 208-210] kullanıldığı görülmektedir. Kullanılacak sistemlerin operatörden gelen komutları boşluksuz olarak robota aktarmaları, herhangi bir güç kaybında hastaya zarar vermeden sistemin hasta üzerinden uzaklaştırılabilmesi ve operatöre acil müdahale için zaman kazandırılması gibi hususların da tasarımında göz önünde bulundurulması gerekmektedir [211-225].



Şekil 6. da Vinci robotik sisteminde laparoskopik cerrahide end efektörün vücuda girdiği noktanın sabitlenmesi sistemi (*The fixing system of the end effectors body-entering point used in the da Vinci robotic system for laparoscopic surgery*)

Bilgisayar tabanlı sistemlerin insanlarla çalışma durumunda hem insandan aldığı komutları yerine getirme, hem de insana karar verme açısından bilgi sağlama fonksiyonları bulunmaktadır. Cerrahi robotik sistemlerde de insan-makine ara yüzünün doğru tasarlanması ve ses, bilgisayarla görme, hastanın organlarından alınan tepkilerin operatöre yansıtılmasını sağlama gibi hususların göz önünde bulundurulması gereklidir [226]. Günümüze kadar gerçekleştirilen çeşitli çalışmalarda farklı hususların ön plana çıkarıldığı görülmektedir. Operasyon bölgesinden alınan görüntüler cerraha çoğu zaman bir bilgisayar monitöründen yansıtılmaktadır. Bu monitör görüntüyü yansıtanın yanında hastayla ilgili diğer verilerin de cerraha doğrudan aktarılması için araç olarak kullanılabilir. Bu sistemler cerrahi navigasyon sistemleri olarak adlandırılmaktadır [227-239].

Bilgisayara komut göndermekte kullanılan ara yüzler arasında ise fare, joystick, dokunmatik ekran, buton, pedal gibi araçlar kullanılmaktadır. Bu araçların ameliyat odasında kullanılması sırasında diğer alanlardaki kullanımlarından farklı olarak bazı hususların göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bunlar arasında sterilizasyon, elektriksel güvenlik, ergonomi vb sayılabilir. Komut vermek amacıyla sesin kullanımı da söz konusu olabilir. Özellikle hasta başında görev yapan sağlık personeli ile iletişim kurmak açısından ses kullanılabilirken, cerrahın el ve ayağının çeşitli kontrol araçları ile meşgul olduğu durumlarda ses ile komut verilmesi de göz önünde bulundurulmalıdır [22, 240].

Cerrahın bilgisayara verdiği komutların organlar üzerinde ne derece etkili olduğu ve organların tepkisinin cerraha hissettirilmesi konusu da büyük öneme sahiptir. Haptik geribildirim olarak adlandırılan bu alan cerrahi robotiğin önemli araştırma alanlarından birini oluşturmaktadır. Robotik cerrahide önemli bir endişe

haptik / kuvvet geribildirim eksikliği olmuştur. Temas duyu kalitesi sağlanan ilerlemelere rağmen, özellikle minimal invaziv cerrahide doku, şekil ve nesnelere uyumu gibi konularda sınırlı kalmaktadır. Kuvvet geribildirim veya dokunma duysusu çok karmaşık teknolojilerdir ve mevcut teknolojilerde ilerleme sağlanabilmesi için gerekli yazılım ve donanım maliyetlerinde önemli artışı göz önüne almak gerekmektedir. Cerrahi işlemin güvenliğini tam sağlamak için geri bildirim sensörlerinin kalibrasyonu da en önemli konulardan birini oluşturmaktadır [226, 234-279].

3. BEKLENTİLER (EXPECTATIONS)

1980'li yıllarda endüstriyel robotların cerrahi amaçlarla kullanılabilirliğinin araştırılmasıyla başlayan cerrahi robot araştırmalarında, aradan geçen 35 yılın sonunda önemli ilerlemeler kaydedilmiş olmakla birlikte ticari hale gelmiş sadece bir robotik sistem bulunmaktadır. Bir kısım avantajlar sağlamakla birlikte bu sistemlerin kullanımının gerek klinik açıdan gerekse operasyon odasında bulunan diğer personel açısından detaylı değerlendirmeler yapılması gerekmektedir. Yapılan literatür taraması sonucunda önümüzdeki süreçte cerrahi robotların mühendislik tarafında aşağıdaki gelişmelerin olması beklenmektedir.

- Ticari sistemlerin artması, bunların gerek edinme gerekse işletme maliyetlerinde azalma olması
- Uzmanlık alanlarıyla paralel olarak amaca yönelik robotik sistemlerin geliştirilmesi, boyutlarının küçültülerek elle taşınabilir sistemlerin geliştirilmesi
- Daha az kesi yapma veya doğal kanallardan müdahaleye imkân veren sistemlerde gelişme sağlanması
- Geri bildirim ve dokunma duysusuna yönelik teknolojilerde ilerleme sağlanması

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon birimi tarafından desteklenen 13FENBİL46 kodlu projenin bir kısmından üretilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Taylor, R. H., Stoianovici, D., "Medical robotics in computer-integrated surgery," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5): 765-781 (2003).
2. Barrett, A. R. W. et al "Preoperative planning and intraoperative guidance for accurate computer-assisted minimally invasive hip resurfacing surgery" *Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: J Engineering in Medicine*, 220 (7): 759-773 (2006).
3. Bradberry, T. J., Gentili, R. J., Contreras-Vidal, J. L. "Fast attainment of computer cursor control with noninvasively acquired brain signals" *J Neural Engineering*, 8 (3): (2011).

4. Shinohara, K. "Consideration of the human-computer interface in the operation room in the era of computer aided surgery" *Communications in Computer and Information Science*, 174 CCIS (PART 2), 72-75 (2011).
5. Staub, C. et al "Automation of tissue piercing using circular needles and vision guidance for computer aided laparoscopic surgery" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 4585-4590 (2010).
6. Taylor, R.H., Kazanzides, P. "Medical Robotics and Computer-Integrated Interventional Medicine" *Advances in Computers*, 73: 219-260 (2008).
7. Xiaohui, X. et al "A robot arm for assisting liver surgery" *Computer-Aided Design and Applications*, 8 (5): 713-722 (2011).
8. Gomes, P. "Surgical robotics: Reviewing the past, analysing the present, imagining the future" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27 (2): 261-266 (2011).
9. Kim, M.Y., Cho, H. "Technological Trend of Endoscopic Robots" *J Institute of Control, Robotics and Systems*, 20 (3), pp. 345-355 (2014).
10. Low, S.C., Phee, L. "A review of master-slave robotic systems for surgery" *2004 IEEE Conf on Robotics, Automation and Mechatronics*, 37-42 (2004).
11. Camarillo, D.B. et al "Mechanics modeling of tendon-driven continuum manipulators" *IEEE Transactions on Robotics*, 24 (6): 1262-1273 (2008).
12. Ishii, C. et al "Double-screw-drive mechanism incorporated multi-DOF robotic forceps manipulator for minimally invasive surgery" *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, C Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part C*, 76 (771): 3042-3050 (2010).
13. Ishii, C. et al "Robotic forceps manipulator with a novel bending mechanism" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15 (5), pp. 671-684 (2010).
14. Ishii, C., Kamei, Y. "On servo experiment of a new multi-DOF robotic forceps manipulator for minimally invasive surgery" *Proceeding of the 5th Int Symposium on Mechatronics and its Applications, ISMA 2008* (2008).
15. Wei, W., Kai, X., Simaan, N. "A compact two-armed slave manipulator for minimally invasive surgery of the throat" *Proc of the First IEEE/RAS-EMBS Int Conf on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2006, BioRob 2006, 2006*, 769-774 (2006).
16. Yang, T., et al "Mechanism of a learning robot manipulator for laparoscopic surgical training" *Advances in Intelligent Systems and Computing, 194 AISC (VOL. 2)*, 17-26 (2013).
17. Yonemura, T. et al "Comparison of pose correspondence methods of master-slave manipulators for neurosurgical robotic systems" *Int J Automation Technology*, 5 (5): 738-745 (2011).
18. Meng, C.R. et al "A guiding robot for minimally invasive spinal surgery based on parallel manipulator" *Advanced Materials Research*, 902: 280-285 (2014).
19. Takahashi, H. et al "Master manipulator with higher operability designed for micro neuro surgical system" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 3902-3907 (2008).
20. www.eaes.eu/getmedia/a7701c3a-ad02-4a2b-a8db-43b8880230b0/Final_consensus_use-of-robotics_Paris.pdf (Erişim Tarihi:01.05.2015).
21. Jankovic, J., Fahn, S. "Physiologic and pathologic tremors. Diagnosis, mechanism, and

- management", *Ann. Internal Med.*, 93: 460 - 465 (1980).
22. Confer, R. G., Bainbridge, R. C. "Voice control in the microsurgical suite", *Proc. Voice I/O Systems Applications Conf.*, '84 (1984)
 23. Garbini, J. L., et al "Robotic instrumentation in total knee arthroplasty", *Proc. 33rd Annu. Meeting, Orthopaedic Research Society*, 413 (1987).
 24. Kwok, Y. S. et al "A robot with improved absolute positioning accuracy for CT-guided stereotactic brain surgery", *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 35: 153 - 161 (1988).
 25. Charles, S. , Williams, R. E., Hamel, B. "Design of a surgeon-machine interface for teleoperated microsurgery", *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 11: 883 -884 (1989).
 26. Guerrouad, A., Vidal, P. "SMOS: Stereotaxical Microtelemanipulator for Ocular Surgery", *Proc. Annu. Int. Conf. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pp.11:879 -11 (1989).
 27. Taylor, R., et al "A robotic system for cementless total hip replacement surgery in dogs", *Proc. 2nd Workshop Medical and Healthcare Robotics* (1989).
 28. Ramacciotti, M. et al "A design paradigm for the development of advanced operating rooms" *Proc of the IASTED Int Conf on Robotics Applications, RA 2014*, 356-361 (2014).
 29. Van Den Berg, J. et al "Superhuman performance of surgical tasks by robots using iterative learning from human-guided demonstrations" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 2074-2081 (2010).
 30. <http://www.scopus.com/authid/detail.url?origin=resultlist&authorId=7405756438 &zone> (erişim tarihi 15.03.2015).
 31. Güven, Y., Barkana, D.E. "Bone cutting trajectory generation using a medical user interface of an orthopedical surgical robotic system" *3rd Int Conf on Human System Interaction, HSI2010 - Conf Proc*, 325-330 (2010).
 32. Güven, Y., Barkana, D.E. "Medical user interface for orthopedical surgical robotic system [Ortopedik cerrahi robotik sistem için tıbbi kullanıcı arayüzü]" *2010 15th National Biomedical Engineering Meeting, BIYOMUT2010* (2010).
 33. Karadogan, E., Williams II, R.L. "A cable-actuated robotic lumbar spine for palpatory training of medical students" *Proc of the ASME Design Engineering Technical Conf, 2 (PARTS A AND B)*, 309-318 (2010).
 34. Turkseven, M., Ueda, J. "Design of an MRI compatible haptic interface" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 2139-2144 (2011).
 35. Güven, Y., Barkana, D.E. "Evaluation of an orthopedic surgical robotic system orthoroby on bone cadaver" *Lecture Notes in Electrical Engineering, 103 LNEE*, 41-52 (2011).
 36. Bebek, Ö., Çavuşoğlu, M.C. "Towards the development of a robotic system for beating heart surgery" *Surgical Robotics: Systems Applications and Visions*, 525-556 (2011).
 37. Sengül, A., et al "Role of holographic displays and stereovision displays in patient safety and robotic surgery" *Advances in Intelligent Systems and Computing, 194 AISC (VOL. 2)*, 143-154 (2013).
 38. Loser, M. and Navab, N. "A new robotic system for visually controlled percutaneous interventions under CT fluoroscopy", *Proc. Medical Image Computing and Computer-Assisted Interventions (MICCAI 2000)*, 887 -896 (2000).
 39. Kennedy, C. W. , Hu, T. and Desai, J. P. "Combining haptic and visual servoing for cardiothoracic surgery", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2106 -2111 (2002).
 40. Krieger, A. et al "Design of a novel MRI compatible manipulator for image guided prostate interventions" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52 (2): 306-313 (2005).
 41. Krieger, A. et al "An MRI-compatible robotic system with hybrid tracking for MRI-guided prostate intervention" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58 (11): 3049-3060 (2011).
 42. Li, M. et al "Pneumatic actuated robotic assistant system for aortic valve replacement under MRI guidance" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58 (2): 443-451 (2011).
 43. Iordachita, I. "Towards clinically optimized MRI-guided surgical manipulator for minimally invasive prostate percutaneous interventions: Constructive design" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1228-1233 (2013).
 44. Blavier, A., Nyssen, A.-S. "The effect of 2D and 3D visual modes on surgical task performance: role of expertise and adaptation processes" *Cognition, Technology and Work*, 16 (4): 509-518 (2014).
 45. Yang, B. et al "Design, development, and evaluation of a master-slave surgical system for breast biopsy under continuous MRI" *Int J Robotics Research*, 33 (4): 616-630 (2014).
 46. Li, G. et al "Robotic System for MRI-Guided Stereotactic Neurosurgery" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62 (4): 1077-1088 (2015).
 47. Cardenas, I.S., Kim, J.-H. "Advanced technique for tele-operated surgery using an intelligent head-mount display system" *Proc - 29th Southern Biomedical Engineering Conf, SBEC 2013*, 143-144 (2013).
 48. Carpi, F. "Robotic magnetic manoeuvring of endoscopic video capsules: Phantom tests" *IFMBE Proc*, 25 (6): 47-50 (2009).
 49. Cho, J.-Y., et al "Verification of registration method using a 3D laser scanner for orthopedic robot systems" *Int Conf on Control, Automation and Systems*, 460-464 (2011).
 50. Padoy, N., Hager, G.D. "3D thread tracking for robotic assistance in tele-surgery" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 2102-2107 (2011).
 51. Finke, M., Schweikard, A. "Usability of a robotic surgical microscope" *2010 3rd IEEE RAS and EMBS Int Conf on Biomedical Robotics and Biomechatronics, BioRob 2010*, 235-240 (2010).
 52. Goncalves, P.J.S. et al "A Vision System for Robotic Ultrasound Guided Orthopaedic Surgery" *J Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 77 (2): 327-339 (2014).
 53. Lee, S.-L. et al "In vivo and in situ image guidance and modelling in robotic assisted surgery" *Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J Mechanical Engineering Science*, 224 (7): 1421-1434 (2010).
 54. Luo, R.C. et al "Surgeon's third hand: An assistive robot endoscopic system with intuitive maneuverability for laparoscopic surgery" *Proc of the IEEE RAS and*

- EMBS Int Conf on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 138-143 (2014).
55. <http://www.intrasense.fr/index.php/en/solutions-en/expert-modules-xp/articles-10-en> (erişim tarihi 15.03.2015).
 56. Moschella, D., Danieli, G.A. "Controlling the traditional rigid endoscopic instrumentation motion" *Proc of EUCOMES 2008 - The 2nd European Conf on Mechanism Science*, 603-611 (2009).
 57. Jiang, J., Xie, L., Yu, H. "A 6-axis sensor for minimally invasive robotic surgery" *Lecture Notes in Computer Science 8103 LNAI (PART 2)*, 429-435 (2013).
 58. Nishikawa, A. et al "How does the camera assistant decide the zooming ratio of laparoscopic images? Analysis and implementation" *Lecture Notes in Computer Science, 5242 LNCS (PART 2)*, 611-618 (2008).
 59. Serracn, J.R. et al "Kinematic analysis of a novel 2-d.o.f. orientation device" *Robotics and Autonomous Systems*, 60 (6): 852-861 (2012).
 60. Shen, J.J. et al "Viscoelastic modeling of the contact interaction between a tactile sensor and an atrial tissue" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59 (6): 1727-1738 (2012).
 61. Wang, D. et al "A novel design of a wearable device for measuring force and torque in vascular surgery" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 2374-2379 (2013).
 62. Wang, H. et al "Robot surgery simulation system for soft tissue cutting" *Lecture Notes in Computer Science 8103 LNAI (PART 2)*, 535-544 (2013).
 63. Priester, A.M., Natarajan, S., Culjat, M. "Robotic ultrasound systems in medicine" *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 60 (3): 507-523 (2013).
 64. Reilink, R., Stramigioli, S., Misra, S. "Image-based hysteresis reduction for the control of flexible endoscopic instruments" *Mechatronics*, 23 (6): 652-658 (2013).
 65. Ott, L. et al "Robotic assistance to flexible endoscopy by physiological-motion tracking" *IEEE Transactions on Robotics*, 27 (2): 346-359 (2011).
 66. Tonet, O. et al "Bioinspired robotic dual-camera system for high-resolution vision" *IEEE Transactions on Robotics*, 24 (1): 55-64 (2008).
 67. Masamune, K., Hong, J. "Advanced Imaging and Robotics Technologies for Medical Applications" *Int J Optomechatronics*, 5 (4): 299-321 (2011).
 68. Torres, P.M.B. et al "Robot calibration for precise ultrasound image acquisition" *Romanian Review Precision Mechanics, Optics and Mechatronics*, 40: 129-134 (2011).
 69. Yang, B., Liu, C. "Robust 3D motion tracking for vision-based control in robotic heart surgery" *Asian J Control*, 16 (3): 632-645 (2014).
 70. <http://www.emdt.co.uk/daily-buzz/automatic-planning-technology-facilitates-shoulder-surgery> (erişim tarihi 15.03.2015).
 71. Burgner, J. et al "Methods for end-effector coupling in robot assisted interventions" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 3395-3400 (2008).
 72. Burgner, J., Raczowsky, J., Woern, H. "End-effector calibration and registration procedure for robot assisted laser material processing: Tailored to the particular needs of short pulsed CO2 laser bone ablation" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 3091-3096 (2009).
 73. Liu, Z. et al "Adaptive fuzzy wavelet neural network filter for hand tremor canceling in microsurgery" *Applied Soft Computing J*, 11 (8): 5315-5329 (2011).
 74. Rocon, E. "Assistive robotics as alternative treatment for tremor" *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 252: 173-179 (2014).
 75. Yang, S., MacLachlan, R.A., Riviere, C.N. "Manipulator design and operation of a six-degree-of-freedom handheld tremor-canceling microsurgical instrument" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20 (2): 761-772 (2015).
 76. Reichenspurner, H. et al "Use of the voice controlled and computer-assisted surgical system ZEUS for endoscopic coronary artery surgery bypass grafting", *J. Thoracic and Cardiovascular Surgery*, 118: (1999).
 77. Vaida, C. et al "Development of a voice controlled surgical robot" *Mechanisms and Machine Science*, 5: 567-574 (2010).
 78. Ishii, C., Futatsugi, T. "Design and control of a robotic forceps manipulator with screw-drive bending mechanism and extension of its motion space" *Procedia CIRP*, 5: 104-109 (2013).
 79. Kanno, T., et al "Design of a 4-DOF forceps manipulator for robotic surgery" *2013 IEEE/SICE Int Symposium on System Integration, SII 2013*, 778-783 (2013).
 80. Chen, W.-W. et al "Design of micro biopsy device for wireless autonomous endoscope" *Int J Precision Engineering and Manufacturing*, 15 (11): 2317-2325 (2014).
 81. Baheti, A. et al "RoSS: Virtual reality robotic surgical simulator for the da vinci surgical system" *Symposium on Haptics Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems 2008 - Proc, Haptics*, 479-480 (2008).
 82. Banerji, A. et al "An interactive GUI for a dual-robot command console" *Proc of the INDICON 2008 IEEE Conf and Exhibition on Control, Communications and Automation*, 1: 98-102 (2008).
 83. Fu, Y., Li, H., Xie, Q. "Master-slave control technology research for abdominal minimally invasive surgery robot" *ASME Int Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proc (IMECE)*, 2: 569-575 (2010).
 84. Baek, Y.M. et al "Highly precise master-slave robot system for super micro surgery" *2010 3rd IEEE RAS and EMBS Int Conf on Biomedical Robotics and Biomechanics, BioRob 2010*, 740-745 (2010).
 85. Guo, J. et al "A new master-slave robotic catheter system" *2011 IEEE/ICME Int Conf on Complex Medical Engineering, CME 2011*, 610-613 (2011).
 86. Li, H., Tadano, K., Kawashima, K. "Achieving force perception in master-slave manipulators using pneumatic artificial muscles" *Proc of the SICE Annual Conf*, 1342-1345 (2012).
 87. De Donno, A. et al "Master/slave control of flexible instruments for minimally invasive surgery" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 483-489 (2013).
 88. Honda, S. et al "Teleoperation of a Master-Slave Pneumatic Robot Arm System over the Internet: Consideration of Delay between Oregon and Fukuoka" *Lecture Notes in Electrical Engineering, 253 LNEE*, 1011-1018 (2013).

89. Di Natali, C. et al "Closed-loop control of local magnetic actuation for robotic surgical instruments" *IEEE Transactions on Robotics*, 31 (1): 143-156 (2015).
90. Kovacs, L., Haidegger, T., Rudas, I. "Surgery from a distance - Application of intelligent control for telemedicine" *SAMI 2013 - IEEE 11th Int Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics, Proc*, 125-129 (2013).
91. Lau, H.Y.K., Wai, L.C.C. "Implementation of position-force and position-position teleoperator controllers with cable-driven mechanisms" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 21 (2): 145-152 (2005).
92. Mahdizadeh, A., Nasser, M.A., Knoll, A. "Transparency optimized interaction in telesurgery devices via time-delayed communications" *IEEE Haptics Symposium, HAPTICS*, 603-608 (2014).
93. Farah, E., Liu, S.G. "3D modeling and closed-form inverse kinematics solution for 6dof surgical robot" *Applied Mechanics and Materials*, 455: 533 - 538 (2014).
94. Drake, J. M. et al. "Computer-and robot-assisted resection of thalamic astrocytomas in children", *Neurosurgery*, 29: 27 - 31 (1991).
95. Yanof, Y. et al "CT-integrated robot for interventional procedures: Preliminary experiment and computer-human interfaces", *Comput. Aided Surgery*, 6: 352 - 359 (2001).
96. Miller, A. et al "From robotic hands to human hands: A visualization and simulation engine for grasping research" *Industrial Robot*, 32 (1): 55-63 (2005).
97. Ren, H., Meng, M.Q.-H. "Investigation of the essentials for integrating off-the-shelf industrial robotics in precise computer-assisted surgery" *J Mechanics in Medicine and Biology*, 11 (5): 1113-1123 (2011).
98. Sackier, J. M. and Wang, Y. "Robotically assisted laparoscopic surgery. From concept to development", *Surgical Endoscopy*, 8: 63 - 66 (1994).
99. Ghodoussi, M., Butner, S. E., and Wang, Y. "Robotic surgery: the transatlantic case", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1882 -1888 (2002).
100. Kazanzides, P. et al "An integrated system for cementless hip replacement", *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, 14: 307 -313 (1995).
101. Guthart, G. S. and Salisbury, J. K. "The intuitive telesurgery system: Overview and application", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA 2000)*, 618 -621 (2000).
102. Kode, V.R.C., Çavuşoğlu, M.C. "Design and characterization of a novel hybrid actuator using shape memory alloy and DC micromotor for minimally invasive surgery applications" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12 (4): 455-464 (2007).
103. Jingke, Y. et al "Design and development of an assisting robotic arm in minimally invasive breast surgery" *2007 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics, ROBIO*, 349-354 (2008).
104. Cronin IV, J.A., Frecker, M., Mathew, A. "Design of a compliant endoscopic suturing instrument" *2007 Proc of the ASME Int Design Engineering Technical Confs and Computers and Information in Engineering Conf, DETC2007, 8 PART A*, 625-635 (2008).
105. Kratchman, L.B. et al "Design of a bone-attached parallel robot for percutaneous cochlear implantation" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 58 (10 PART 1): 2904-2910 (2011).
106. Liang, K. et al "Control system design of a novel minimally invasive surgery robot" *2011 IEEE/ICME Int Conf on Complex Medical Engineering, CME 2011*, 394-399 (2011).
107. Pislá, D. "Kinematic modelling of a 5-DOF hybrid parallel robot for laparoscopic surgery" *Robotica*, 30 (7): 1095-1107 (2012).
108. Mintenbeck, J., Estana, R., Woern, H. "Design of a modular, flexible instrument with integrated DC-motors for minimal invasive robotic surgery" *IEEE/ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing, AIM 2013*, 1249-1254 (2013).
109. Boiadjev, G. et al "Modeling and development of a robotized hand-held bone cutting device" *Applied Mechanics and Materials*, 700-301: 479-483 (2013).
110. Lee, R. et al "Hand-held force magnifier for surgical instruments: Evolution toward a clinical device" *Lecture Notes in Computer Science 7815 LNCS*, 77-89 (2013).
111. MacLachlan, R.A. "Micron: An actively stabilized handheld tool for microsurgery" *IEEE Transactions on Robotics*, 28 (1): 195-212 (2012).
112. Payne, C.J., Yang, G.-Z. "Hand-held medical robots" *Annals of Biomedical Engineering*, 42 (8): 1594-1605 (2014).
113. Petersen, J.G., Rodriguez Baena, F. "Mass and inertia optimization for natural motion in hands-on robotic surgery" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 4284-4289 (2014).
114. Stetten, G. et al "Hand-held force magnifier for surgical instruments" *Lecture Notes in Computer Science 6689 LNCS*, 90-100 (2011).
115. Entsfellner, K. et al "Development of universal gripping adapters: Sterile coupling of medical devices and robots using robotic fingers" *IEEE/ASME Int Conf on Advanced Intelligent Mechatronics: Mechatronics for Human Wellbeing, AIM 2013*, 1464-1469 (2013).
116. Chinzei, K., Kikinis, R., Jolesz, F. A. "MR compatibility of mechatronic devices: design criteria", *Lecture Notes in Computer Science*, 1679: 1020 -1030 (1999).
117. Chinzei, K. et al "MR compatible surgical assist robot: System integration and preliminary feasibility study", *Proc. 3rd Int. Conf. Medical Robotics, Imaging and Computer Assisted Surgery*, 921 -930 (2000).
118. Greer, A.D., Newhook, P.M., Sutherland, G.R. "Human-machine interface for robotic surgery and stereotaxy" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 13 (3): 355-361 (2008).
119. Stoyanov, D. et al "Real-time stereo reconstruction in robotically assisted minimally invasive surgery" *Lecture Notes in Computer Science, 6361 LNCS (PART 1)*, 275-282 (2010).
120. Sun, Y. et al "State recognition of bone drilling with audio signal in Robotic Orthopedics Surgery System" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 3503-3508 (2014).
121. Yu, L. "A new kinematics method based on a dynamic visual window for a surgical robot" *Robotica*, 32 (4): 571-589 (2014).
122. Simaan, N., Taylor, R., Flint, P. "High dexterity snake-like robotic slaves for minimally invasive telesurgery of the upper airway" *Lecture Notes in Computer Science, 3217 (1 PART 2)*, 17-24 (2004).

123. Shin, W.-H., Ko, S.-Y., Kwon, D.-S. "Design of a dexterous and compact laparoscopic assistant robot" *2006 SICE-ICASE Int Joint Conf*, 233-237 (2006).
124. Shinsuk, P. "Safety strategies for human-robot interaction in surgical environment" *2006 SICE-ICASE Int Joint Conf*, 1769-1773 (2006).
125. Sharkey, N., Sharkey, A. "Robotic surgery and ethical challenges" *Medical Robotics: Minimally Invasive Surgery*, 276-291 (2012).
126. Jang, J., Kim, Y.S. "Safety management algorithm for telesurgical robot system for brain tumor surgery" *44th Int Symposium on Robotics* (2013).
127. Sanchez, L.A., et al "A case study of safety in the design of surgical robots: The ARAKNES platform" *Advances in Intelligent Systems and Computing, 194 AISC (VOL. 2)*, 121-130 (2013).
128. Jin, H. et al "Safety analysis and control of a robotic spinal surgical system" *Mechatronics*, 24 (1): 55-65 (2014).
129. Sullins, J.P. "Ethical trust in the context of robot assisted surgery" *AISB 2014 - 50th Annual Convention of the AISB* (2014).
130. Davies, B. et al "A discussion of safety issues for medical robots", *Computer-Integrated Surgery*, 287 - 296 (1996).
131. Du, Q., Zhang, X., Zou, L. "Design optimization of a minimally invasive surgical robot" *IEEE ICIT 2007 - 2007 IEEE Int Conf on Integration Technology*, 179-184 (2007).
132. Farkoush, S.H. et al "Design and construction of a novel surgical instrument applicable in esophagectomy" *IFMBE Proc*, 24: 21-22 (2009).
133. Chen, Y., Tanaka, S., Hunter, I.W. "Disposable endoscope tip actuation design and robotic platform" *2010 Annual Int Conf of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBC'10*, 2279-2282 (2010).
134. Kim, K.-Y. et al "Design and evaluation of a teleoperated surgical manipulator with an additional degree of freedom for laparoscopic surgery" *Advanced Robotics*, 24 (12): 1695-1718 (2010).
135. Guo, W.Z., Gao, F. "Solution space atlases, workspace characteristics charts and joint space maps for the design of planar serial manipulators" *Mechanism and Machine Theory*, 45 (3): 392-407 (2010).
136. Nelson, C.A., Zhang, X. "Equivalent mechanisms techniques for redesign of a spherical surgical tool manipulator" *Proc of the ASME Design Engineering Technical Conf, 2 (PARTS A AND B)*, 11-17 (2010).
137. Ohno, S., Hiroki, C., Yu, W. "Design and manipulation of a suction-based micro robot for Moving in the abdominal cavity" *Advanced Robotics*, 24 (12): 1741-1761 (2010).
138. Pisla, D. "On the dynamics of a 5 DOF parallel hybrid robot used in minimally invasive surgery" *Mechanisms and Machine Science*, 5: 691-699 (2010).
139. Phee, S.J. et al "Design of a master and slave transluminal endoscopic robot for natural orifice transluminal endoscopic surgery" *Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J Mechanical Engineering Science*, 224 (7): 1495-1503 (2010).
140. Pisla, D. et al "Kinematics and workspace modeling of a new hybrid robot used in minimally invasive surgery" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29 (2): 463-474 (2013).
141. Pisla, D., et al "An active hybrid parallel robot for minimally invasive surgery" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29 (4): 203-221 (2013).
142. Garg, A. et al "Design and development of in vivo robot for biopsy" *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 42 (3): 278-295 (2014).
143. Hong, M.B., Jo, Y.-H. "Design of a novel 4-DOF wrist-type surgical instrument with enhanced rigidity and dexterity" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19 (2): 500-511 (2014).
144. Pile, J., Simaan, N. "Modeling, design, and evaluation of a parallel robot for cochlear implant surgery" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19 (6): 1746-1755 (2014).
145. Feng, M. "Design and implementation of the robotic end effector for minimally invasive celiac surgery" *Jiqiren/Robot*, 31 (1): 47-52 (2009).
146. Lee, J. et al "Cooperative robotic assistant with drill-by-wire end-effector for spinal fusion surgery" *Industrial Robot*, 36 (1): 60-72 (2009).
147. Piccigallo, M. et al "Design of a novel bimanual robotic system for single-port laparoscopy" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15 (6): 871-878 (2010).
148. Sekiguchi, Y. et al "Development of a tool manipulator driven by a flexible shaft for Single-Port Endoscopic Surgery" *J Robotics and Mechatronics*, 23 (6): 1115-1124 (2011).
149. Terry, B.S. et al "Single-port-access surgery with a novel magnet camera system" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59 (4): 1187-1193 (2012).
150. Choi, H., et al "Surgical robot for single-incision laparoscopic surgery" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61 (9): 2458-2466 (2014).
151. Seung, S. et al "Single-port robotic manipulator system for brain tumor removal surgery: SiromanS" *Mechatronics*, 26: 16-28 (2015).
152. Stoianovici, D. et al "An efficient needle injection technique and radiological guidance method for percutaneous procedures", *Proc. 1st Joint Conf.: CRVMed II & MRCAS III*, 295 -298 (1997).
153. Stoianovici, D. et al "A modular surgical robotic system for image-guided percutaneous procedures", *Proc. Medical Image Computing and Computer-Assisted Interventions (MICCAI,98)*, 404 -410 (1998).
154. Xu, K. et al "System design of an insertable robotic effector platform for Single Port Access (SPA) surgery" *2009 IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems, IROS 2009*, 5546-5552 (2009).
155. Ding, J. et al "Design, simulation and evaluation of kinematic alternatives for insertable robotic effectors platforms in single port access surgery" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1053-1058 (2010).
156. Zahraee, A.H. et al "Robotic hand-held surgical device: Evaluation of end-effector's kinematics and development of proof-of-concept prototypes" *Lecture Notes in Computer Science, 6363 LNCS (PART 3)*, 432-439 (2010).
157. Berenson, D., Abbeel, P., Goldberg, K. "A robot path planning framework that learns from experience" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 3671-3678 (2012).
158. Jackson, R.C., Cavusoglu, M.C. "Needle path planning for autonomous robotic surgical suturing" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1669-1675 (2013).

159. Berkelman, P., Ma, J. "A compact modular teleoperated robotic system for laparoscopic surgery" *Int J Robotics Research*, 28 (9): 1198-1215 (2009).
160. Boiadjev, G. et al "Robotized system for bone drilling and cutting in orthopedic surgery" *Advanced Materials Research*, 740: 92-98 (2013).
161. Brett, P.N. et al "A smart generic micro-drilling tool applied in cochleostomy" *IFMBE Proc.*, 25 (6): 314-316 (2009).
162. Castro, C.A. et al "A wireless robot for networked laparoscopy" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 60 (4): 930-936 (2013).
163. Chen, Y.Q., Sun, P.L. "Medical image processing system for minimally invasive spine surgery" *Advances in Intelligent and Soft Computing*, 128: 177-182 (2011).
164. Chow, D.-L. et al "A novel vision guided knot-tying method for autonomous robotic surgery" *IEEE Int Conf on Automation Science and Engineering*, 504-508 (2014).
165. Chow, D.-L., Newman, W. "Improved knot-tying methods for autonomous robot surgery" *IEEE Int Conf on Automation Science and Engineering*, 461-465 (2013).
166. Davies, B.L. "Robotic orthopedic surgery: From research to spin-off to acquisition" *18th Annual Int Conf on Mechatronics and Machine Vision in Practice 2011, M2VIP 2011*, 138-157 (2011).
167. Davies, B.L. et al "The Acrobot® system for robotic mis total knee and uni-condylar arthroplasty" *Int J Humanoid Robotics*, 3 (4): 417-428 (2006).
168. Ding, J., Simaan, N. "Choice of handedness and automated suturing for anthropomorphic dual-arm surgical robots" *Robotica*, 72 (2014).
169. Grossmann, C.M. "A new AS-display as part of the MIRO lightweight robot for surgical applications" *Proc of SPIE - The Int Society for Optical Engineering*, 7524, art. no. 752403 (2010).
170. Jacob, M.G., Li, Y.-T., Wachs, J.P. "A gesture driven robotic scrub nurse" *Conf Proc - IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics*, 2039-2044 (2011).
171. Kanaan, M. "Ranging based on maximum likelihood techniques for ultra wideband medical implants" *IEEE Int Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, 2234-2238 (2011).
172. Kim, D. et al "Development of a medical robot system for pedicle screw surgery assisted by fluoroscopic X-ray image" *Proc of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, ARSO*, 62-65 (2011).
173. Kim, L., Tang, S.C., Yoo, S.-S. "Prototype modular capsule robots for capsule endoscopies" *Int Conf on Control, Automation and Systems*, 350-354 (2013).
174. Kim, Y.H., le Minh, H. "A laboratory-level surgical robot system for minimal invasive surgery (MIS) total knee arthroplasty" *Int J Precision Engineering and Manufacturing*, 12 (2): 237-242 (2011).
175. Lee, W.-Y., Shih, C.-L. "Control and breakthrough detection of a three-axis robotic bone drilling system" *Mechatronics*, 16 (2): 73-84 (2006).
176. Leonard, S. "Smart tissue anastomosis robot (STAR): A vision-guided robotics system for laparoscopic suturing" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61 (4): 1305-1317 (2014).
177. Lum, M.J.H. et al "The RAVEN: Design and validation of a telesurgery system" *Int J Robotics Research*, 28 (9): 1183-1197 (2009).
178. Luo, H., Ding, J., Wang, S. "A master-slave robot system for minimally invasive laryngeal surgery" *2009 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2009*, 782-787 (2009).
179. Moral, A.I. et al "Paranasal sinuses segmentation/reconstruction for robot assisted endonasal surgery" *Proc of VIPIMAGE 2007 - 1st ECCOMAS Thematic Conf on Computational Vision and Medical Image Processing*, 175-182 (2008).
180. Patronik, N.A., Zenati, M.A., Riviere, C.N. "Crawling on the heart: A mobile robotic device for minimally invasive cardiac interventions" *Lecture Notes in Computer Science, 3217 (1 PART 2)*, 9-16 (2004).
181. Raabe, D., Dogramadzi, S., Atkins, R. "Semi-automatic percutaneous reduction of intra-articular joint fractures - An initial analysis" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 2679-2684 (2012).
182. Seung, S. et al "Development of image guided master-slave system for minimal invasive brain surgery" *Joint 41st Int Symposium on Robotics and 6th German Conf on Robotics 2010, ISR/ROBOTIK 2010*, 2: 710-715 (2010).
183. Russo, S., Dario, P., Menciassi, A. "A novel robotic platform for laser-assisted transurethral surgery of the prostate" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62 (2): 489-500 (2014).
184. Tadano, K., Kawashima, K. "Development of a master-slave system with force-sensing abilities using pneumatic actuators for laparoscopic surgery" *Advanced Robotics*, 24 (12): 1763-1783 (2010).
185. Taylor, R. et al "A sensory-guided surgical micro-drill" *Proc of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: J Mechanical Engineering Science*, 224 (7): 1531-1537 (2010).
186. Wang, T. et al "A removable hybrid robot system for long bone fracture reduction" *Bio-Medical Materials and Engineering*, 24 (1): 501-509 (2014).
187. Wang, X.-T. et al "Structure design and master-slave control system of a vascular interventional robot" *2011 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011*, 252-257 (2011).
188. Westphal, R. et al "Robot-assisted long bone fracture reduction" *Int J Robotics Research*, 28 (10): 1259-1278 (2009).
189. Wolf, A., Jaramaz, B. "MBARS: Mini bone attached robotic system for joint arthroplasty" *Proc of the First IEEE/RAS-EMBS Int Conf on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2006, BioRob 2006*, 1053-1058 (2006).
190. Taylor, R. H. et al "A model-based optimal planning and execution system with active sensing and passive manipulation for augmentation of human precision in computer-integrated surgery", *Proc. 2nd Int. Symp. Experimental Robotics* (1991).
191. Taylor, R. H. et al "A passive/active manipulation system for surgical augmentation", *Proc. 1st Int. Workshop on Mechatronics in Medicine* (1992).
192. Taylor, R. H. et al "Augmentation of human precision in computer-integrated surgery", *Innovation et Technol. Biol. Med.*, 13: 450-459 (1992).
193. Potamianos, P., Davies, B. L., Hibberd, R. D. "Intra-operative imaging guidance for keyhole surgery methodology and calibration", *Proc. 1st Int. Symp. Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 1: 98-104 (1994).

194. Schneider, O., Troccaz, J. "A six-degree-of-freedom passive arm with dynamic constraints (PADyC) for cardiac surgery application: Preliminary experiments", *Comput. Aided Surgery*, 6: 340 - 351 (2001).
195. Lee, H., Choi, Y., Yi, B.-J. "Stackable 4-BAR manipulators for single port access surgery" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 17 (1): 157-166 (2012).
196. Rivas-Blanco, I. et al "Force-position control for a miniature camera robotic system for single-site surgery" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 3065-3070 (2013).
197. Rivas-Blanco, I. et al "Single incision laparoscopic surgery using a miniature robotic system" *IFMBE Proc*, 41: 105-108 (2014).
198. Dimaio, S., Hanuschik, M., Kreaden, U. "The Da Vinci surgical system" *Surgical Robotics: Systems Applications and Visions*, 199-217 (2011).
199. Li, J. et al "A class of 2-degree-of-freedom planar remote center-of-motion mechanisms based on virtual parallelograms" *J Mechanisms and Robotics*, 6 (3): art. no. 031014 (2014).
200. Locke, R.C.O., Patel, R.V. "Optimal remote center-of-motion location for robotics-assisted minimally-invasive surgery" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 1900-1905 (2007).
201. Marinho, M.M., Bernardes, M.C., Bó, A.P.L. "A programmable remote center-of-motion controller for minimally invasive surgery using the dual quaternion framework" *Proc of the IEEE RAS and EMBS Int Conf on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 339-344 (2014).
202. Mitsuishi, M. et al "A telerobotics system with collocated view and operation points and rotational-force-feedback-free master manipulator", *Proc. 2nd Int. Symp. Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 111 -118 (1995).
203. Cutting, C. B. et al "Applications of simulation, morphometrics and robotics in craniofacial surgery", *Computer-Integrated Surgery*, 641 - 662 (1996).
204. Lavallee, S. et al "Image-guided operating robot: a clinical application in stereotactic neurosurgery", *Computer-Integrated Surgery*, 343 - 352 (1996).
205. Taylor, R. H. et al "A telerobotic assistant for laparoscopic surgery", *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, 14: 279 -287 (1995).
206. Kobayashi, E. et al "A new safe laparoscopic manipulator system with a five-bar linkage mechanism and an optical zoom", *Comput. Aided Surgery*, 4: 182 - 192 (1999).
207. Taylor, R. H. et al "A steady-hand robotic system for microsurgical augmentation", *Int. J. Robot. Res.*, 18: (1999).
208. Begin, E. et al "A robotic camera for laparoscopic surgery: conception and experimental results", *Surgical Laparoscopy and Endoscopy*, 5: (1995)
209. Sackier J. M. et al "Robotically assisted laparoscopic surgery: from concept to development", *Computer-Integrated Surgery*, 577 -580 (1996).
210. Berkelman, P. et al "A compact, compliant laparoscopic endoscope manipulator", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1870 -1875 (2002).
211. Carbone, G., Ceccarelli, M. "A serial-parallel robotic architecture for surgical tasks" *Robotica*, 23 (3): 345-354 (2005).
212. Sang, H., He, C., Li, J., Zhang, L. "Dynamic modeling and trajectory tracking control for a 3-DOF instrument in minimally invasive surgery" *2009 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2009*, 331-336 (2009).
213. Savioz, G., Perriard, Y. "Miniature short-stroke linear actuator" *IEEE Industry Applications Magazine*, 17 (6): 14-19 (2011).
214. Seow, C.M., Chin, W.J., Nelson, C.A. "Robot kinematic design studies for natural orifice surgery" *Proc of the ASME Design Engineering Technical Conf, 6 (PARTS A AND B)*, 605-613 (2011).
215. Shang, J., et al "Design of a multitasking robotic platform with flexible arms and articulated head for Minimally Invasive Surgery" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 1988-1993 (2012).
216. Tang, C., Zhang, J., Cheng, S. "Kinematics analysis for a hybrid robot in minimally invasive surgery" *2009 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2009*, 1941-1946 (2009).
217. Tawfik, K., Ata, A.A., Al-Tabey, W.A. "Kinematics and dynamics analysis of micro-robot for surgical applications" *World J Modelling and Simulation*, 5 (1): 22-29 (2009).
218. Voros, S. et al "ViKY robotic scope holder: Initial clinical experience and preliminary results using instrument tracking" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 15 (6): 879-886 (2010).
219. Wang, H. et al "A novel surgery robotic system used for minimally invasive" *Int J Innovative Computing, Information and Control*, 10 (2): 617-629 (2014).
220. Webster III, R.J., Romano, J.M., Cowan, N.J. "Kinematics and calibration of active cannulas" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 3888-3895 (2008).
221. Ye, R., Chen, Y., Yau, W. "A simple and novel hybrid robotic system for robot-assisted femur fracture reduction" *Advanced Robotics*, 26 (1-2): 83-104 (2012).
222. Frasson, L. et al "Early developments of a novel smart actuator inspired by nature" *15th Int Conf on Mechatronics and Machine Vision in Practice, M2VIP'08*, 163-168 (2008).
223. Haraguchi, D., Tadano, K., Kawashima, K. "Development of a pneumatically-driven robotic forceps with a flexible wrist joint" *Procedia CIRP*, 5: 61-65 (2013).
224. He, C., et al "Kinematics analysis of the coupled tendon-driven robot based on the product-of-exponentials Formula" *Mechanism and Machine Theory*, 60: 90-111 (2013).
225. Olds, K.C. et al "Preliminary evaluation of a new microsurgical robotic system for head and neck surgery" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 1276-1281 (2014).
226. Sheridan, T. B. et al "Haptics and supervisory control in telesurgery", *Proc. 41st Human Factors and Ergonomics Society*, 2, 1134 -1137 (1997).
227. Adams, L. et al "CAS, a navigation support for surgery", *3D Imaging in Medicine*, 411 - 423, Springer-Verlag (1990).
228. Smith, K. R., Frank, K. J., Bucholz, R. D. "The neurostation, a highly accurate minimally invasive solution to frameless stereotactic

- neurosurgery", *Comput. Med. Imaging Graph.*, 18: 247 -256 (1994).
229. Taylor, R. H. et al "A telerobotic assistant for laparoscopic surgery", *Computer-Integrated Surgery*, 581 -592 (1996).
230. Reinhardt, H. F. et al "Neuronavigation: a ten years review", *Computer-Integrated Surgery*, 329 - 342, MIT Press (1996).
231. DiGioia, A. M. et al "HipNav: pre-operative planning and intra-operative navigational guidance for acetabular implant placement in total hip replacement surgery", *Comput. Assisted Orthopedic Surgery* (1996).
232. Simon, D. A. et al "Development and validation of a navigational guidance system for acetabular implant placement", *Proc. 1st Joint Conf. CVRMed and MRCAS*, 583 -592 (1997).
233. Nolte, L. P. et al "Use of C-arm for surgical navigation in the spine", *Proc. CAOS/USA'98* (1998).
234. Yang, J., Yang, B., Cui, F. "Design of a computer aided surgical navigation system based on C-arm" *Proc of the IEEE Int Conf on Automation and Logistics, ICAL 2008*, 73-76, (2008).
235. Zhai, W., Zhao, Y., Jia, P. "A navigation system for minimally invasive abdominal intervention surgery robot" *2008 IEEE Int Conf on Robotics, Automation and Mechatronics, RAM 2008*, 819-823, (2008).
236. Bauzano, E. et al "Control methodologies for endoscope navigation in robotized laparoscopic surgery" *Communications in Computer and Information Science, 82 CCIS*, 11-22 (2010).
237. Bauzano, E., Muñoz, V.F., Garcia-Morales, I. "A multi-behaviour algorithm for auto-guided movements in surgeon assistance" *Int J Mechanics and Control*, 12 (1): 35-41 (2011).
238. Wang, Y., Xiao, N., Guo, S. "Design of a surgeon's controller for catheter navigation" *IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation, IEEE ICMA 2013*, 974-978 (2013).
239. Bauzano, E. et al "Robot collaborative assistance for suture procedures via minimally invasive surgery" *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 252: 255-269 (2014).
240. Uecker, D. R. et al "A speech-directed multi-modal man-machine interface for robotically enhanced surgery", *Proc. 1st Int. Symp. Medical Robotics and Computer Assisted Surgery (MRCAS '94)*, 176 -183 (1994).
241. Howe, R. D. et al "Remote palpation technology", *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, 318 - 323 (1995).
242. Aulignac, D. D, Balaniuk, R., Laugier, C. "A haptic interface for a virtual exam of the human thigh", *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 2452 -2457 (2000).
243. Kumar, R. et al "Preliminary experiments in cooperative human/robot force control for robot assisted microsurgical manipulation", *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, 610 -617 (2000).
244. Kumar, R. *An augmented steady-hand system for precise micromanipulation*, PhD thesis, The Johns Hopkins Univ (2001).
245. Berkelmann, P. J. et al "Performance evaluation of a cooperative manipulation microsurgical assistant robot applied to stapedotomy", *Proc. Medical Image Computing and Computer-Assisted Interventions (MICCAI 2001)*, 1426 -1429 (2001).
246. Nudehi, S.S., Mukherjee, R., Ghodoussi, M. "A shared-control approach to haptic interface design for minimally invasive telesurgical training" *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13 (4): 588-592 (2005).
247. Fujino, S. et al "Displaying feeling of cutting by a micro-scissors type haptic device" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 2067-2072 (2008).
248. Holbert, B., Huber, M. "Building a haptically enhanced computer desktop for the physically disabled using a force feedback mouse" *Proc of the 4th IASTED Int Conf on Telehealth and Assistive Technologies, Telehealth/AT 2008*, 25-30 (2008).
249. Gyurka, B. et al "The control of the PARAMIS parallel robot using a haptic device" *2010 IEEE Int Conf on Automation, Quality and Testing, Robotics, AQTR 2010 - Proc*, 1: 354-359 (2010).
250. Perreault, S. et al "A 7-DOF haptics-enabled teleoperated robotic system: Kinematic modeling and experimental verification" *2010 3rd IEEE RAS and EMBS Int Conf on Biomedical Robotics and Biomechanics, BioRob 2010*, 906-911 (2010).
251. Sun, Z., Wang, Z., Phee, S.J. "Towards haptics enabled surgical robotic system for NOTES" *IEEE Conf on Robotics, Automation and Mechatronics, RAM - Proc*, 229-233 (2011).
252. Li, H., et al "Achieving haptic perception in forceps manipulator using pneumatic artificial muscle" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18 (1): 74-85 (2013).
253. Sun, Z., Wang, Z., Phee, S.J. "Haptic modeling of stomach for real-time property and force estimation" *J Mechanics in Medicine and Biology*, 13 (3): (2013).
254. Syed, A.A. et al "Maxillofacial surgical robotic manipulator controlled by haptic device with force feedback" *ICME Int Conf on Complex Medical Engineering, CME 2013*, 363-368 (2013).
255. Yoon, S.-M., Choi, W.-H., Lee, M.-C. "Backlash compensation by smooth backlash inverse for haptic master device using cable-conduit" *Int Conf on Control, Automation and Systems*, 127-132 (2014).
256. Lee, D.-H., Kim, U., Choi, H.R. "Development of multi-axial force sensing system for haptic feedback enabled minimally invasive robotic surgery" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 4309-4314 (2014).
257. Marbán, A. et al "Haptic feedback in surgical robotics: Still a challenge" *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 252: 245-253 (2014).
258. Azuma, D., Lee, J., Narumi, K., Arai, F. "Fabrication and feedback control of an articulated microarm" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 3073-3078 (2009).
259. McMahan, W. et al "Tool contact acceleration feedback for telerobotic surgery" *IEEE Transactions on Haptics*, 4 (3): 210-220 (2011).
260. Schäfer, F., Zoppi, M., Molfino, R. "Design of a 6-DOF force-feedback joystick for robotic laparoscopic surgery" *39th Int Symposium on Robotics, ISR 2008*, 808-813 (2008).
261. Trejo, F., Hu, Y. "Suitability of two models of torque feedback for performing a robot-assisted circular tracing task" *Proc - 2013 IEEE Int Conf on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2013*, 3366-3371 (2013).

262. Boonvisut, P., Çavuşoğlu, M.C. "Estimation of soft tissue mechanical parameters from robotic manipulation data" *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18 (5): 1602-1611 (2013).
263. Dong, J., Zhang, L., Yu, L., Liu, E. "Puncture locating for laparoscopic robot in minimally invasive surgery" *Proc - 2008 2nd Int Symposium on Intelligent Information Technology Application, IITA 2008*, 1: 658-662 (2008).
264. Duchemin, G. et al "A hybrid position/force control approach for identification of deformation models of skin and underlying tissues" *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 52 (2): 160-170 (2005).
265. Gherman, B. et al "Development of inverse dynamic model for a surgical hybrid parallel robot with equivalent lumped masses" *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 28 (3): 402-415 (2012).
266. Hu, T. et al "Insertable surgical imaging device with pan, tilt, zoom, and lighting" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 2948-2953 (2008).
267. Jiang, J. et al "Development of a six-dimensional sensor for minimally invasive robotic surgery" *J Mechanics in Medicine and Biology*, 14 (5): (2014).
268. Rosen, J. et al "Macro and micro soft-tissue biomechanics and tissue damage: Application in surgical robotics" *Surgical Robotics: Systems Applications and Visions*, 583-618 (2011).
269. Schwalb, W., Shirinzadeh, B., Smith, J. "Surgical slave with a novel method for force sensing and trocar friction reduction" *Advanced Materials Research*, 622: 1362-1367 (2013).
270. Tanaka, T., Guo, S., Xiao, N. "Development of a doctor's finger motion measurement device for a remote catheter operating system" *IEEE Int Conf on Mechatronics and Automation, IEEE ICMA 2013*, 963-967 (2013).
271. Teoh, S.H., Chui, C.K. "Bone material properties and fracture analysis: Needle insertion for spinal surgery" *J the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 1 (2): 115-139 (2008).
272. Wang, X., Qi, H.J., Rentschler, M.E. "Analysis of wheel-tissue interaction for in vivo robotic mobility" *ASME Int Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proc (IMECE)*, 9: 685-694 (2010).
273. Yang, B., Wong, W.-K., Liu, C., Poignet, P. "3D soft-tissue tracking using spatial-color joint probability distribution and thin-plate spline model" *Pattern Recognition*, 47 (9): 2967-2973 (2014).
274. Zemiti, N., Ortmaier, T., Morel, G. "A new robot for force control in minimally invasive surgery" *IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 4: 3643-3648 (2004).
275. Kim, K.-Y. et al "Human arm-like surgical robot system with force reflection measurement for minimally invasive surgery" *Proc of the 14th Int Symposium on Artificial Life and Robotics, AROB 14th'09*, 313-316 (2009).
276. Kosari, S.N. et al "Robotic compression of soft tissue" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 4654-4659 (2012).
277. Li, M., Gu, A., Yang, S., Lu, C. "Simulation of whisker sensor in robotic assisted beating cardiac surgery" *Advanced Materials Research*, 403-408: 4073-4078 (2012).
278. Luo, R.C. et al "Cartesian position and force control with adaptive impedance/compliance capabilities for a humanoid robot arm" *Proc - IEEE Int Conf on Robotics and Automation*, 496-501 (2013).
279. Mayer, H. et al "A system for robotic heart surgery that learns to tie knots using recurrent neural Networks" *IEEE Int Conf on Intelligent Robots and Systems*, 543-548 (2006).

Yürüme Engelli Bireyler için Pedaldan Kumandalı Dikiş Makinelerinin Kumanda Bileklik Sistemi ile Kontrolü

Harun SÜMBÜL^{1*}, Yusuf YAKUT²

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Samsun, Türkiye

²Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Samsun, Türkiye

(Geliş / Received : 20.7.2015 ; Kabul / Accepted : 26.11.2015)

ÖZ

Bu çalışmada, hazır giyim, örgü, çorap vb. sektörlerde, ayak yardımı ile pedaldan kumanda edilen makinelerin, kablosuz olarak uzaktan kontrolünü sağlayan Kumanda Bileklik Sistemi (KBS) tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Tasarım, kablosuz bağlantı ile kullanım kolaylığı sağlarken işin özelliğine göre verim ve performansı artırıcı özelliklere de sahiptir. Gerçekleştirilen kumanda bilekliklin en önemli özelliklerinden birisi, makinenin kontrol sistemini sağlarken elin iş yapma kabiliyetini engellemeyecek bir yapıda olmasıdır. KBS, mevcut sistemlerde kullanılan pedallı makinelere kolayca adapte olabilmekte ve makinelerin orijinal aksamlarına da herhangi bir zarar vermemektedir. KBS' ye ait diğer özellikler: hassasiyet, bileği yormama, hafiflik, rahat kullanılabilirlik, estetik görünüm, ergonomik tasarım, aynı ortamda çoklu çalışabilme vb. şeklindedir. Gerçekleştirilen KBS, engelli bireylerin kullanımına sunulmuş olup, gerçek ortamlarda yapılan denemeler sonucunda, ürünün sorunsuz çalıştığı ve hedeflenen amaca hizmet ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kumanda bileklik sistemi, pedallı kontrol, elektromekanik, kalosuz kontrol, dikiş makineleri

The Control of Treadle Sewing Machines with Wristbands Control System for Persons with Walking Disabled

ABSTRACT

In this study, a Wristbands Control System (WCS) that allowing as a wireless the remote control of some machines that controlled by pedal with the help of the foot, in the sectors such as socks, apparel, knitting, hosiery, have been desinged and developed. The design has features like increase efficiency and performance according to the business's property while providing ease of use with a wireless connection. One of the most important properties of performed control wristband is a structure that do not prevent hands's ability do the job, while the machine control. The WCS will also be able to adapt to the pedal machines used in the current system easily and the components of the original machine also will not be any harm. The other features of WCS are: sensitivity wrist does not tire, light weight, comfortable usability, aesthetic appearance, ergonomic design, in the same environment to operate multiple.etc. The performed WCS has been available to people with walking disabled, has received full marks from the experiments in sector.

Keywords: Control wristband system, pedal control, electromechanical, wireless control, sewing machines.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstri alanındaki teknolojik gelişmeler, ürün ve hizmetlerden talep edilen kalite standartlarını oldukça yükseltmiştir. İstenilen kaliteyi elde ederken, maliyetleri en aza indirebilecek ve yeniliklere açık kontrol sistemlerinin uygulamaya konulması zorunlu hale gelmiştir. Dolayısıyla birçok malzemenin üretim ve kontrolü de elektromekanik sistemler ile gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bilgisayarların bu sistemlere uyumu, kontrol işlemini daha da kolaylaştırmıştır [1-3]. Günümüzde, kontrol işlemi sağlayan sistemler, kimi cihazlar için üretim aşamasında, cihaz üzerinde ve tek parça olarak

üretirken, kimi cihazlar için ise cihaza sonradan takılan ve aynı zamanda cihaza farklı fonksiyonlar da yükleyebilen sistemler şekilde üretilmektedir. Böylelikle ilgili makinenin orijinal aksamına dokunulmadan, makineye; yüksek verim, kullanım kolaylığı, enerji tasarrufu, hızlı kontrol vb. gibi birçok özellik kazandırılmış olur. Bu durumun makine kullanıcıları açısından en avantajlı yanlarından birisi ise, üretim esnasında makinede bulunmayan fakat sonradan makineye ilave edilmesi ile makine kullanıcı sayısının artırılmasıdır. Böylelikle farklı özelliklere sahip (dezavantajlı grup olan ortopedik engelli bireyler gibi) işçilerin aynı makineleri kullanabilmeleri ve o makine de üretilen ürün sayısının artması söz konusu olur. Bu duruma, engelli bireylerin istihdamı noktasından

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: harunsumbul@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 245-249

yaklaşıldığında ise ortaya oldukça güzel neticeler çıkabilmektedir. Zira kendini toplumdan ve sosyal yaşamdan uzak hisseden engelli bireyler, yapılacak bu teknolojik iyileştirme sonucu bir iş sahibi olacak ve toplumla kucaklaşarak aile ekonomisine vereceği katkı ile kendisini dışlanmış olarak görmekten çıkacaktır. Çünkü "engelli kavramı; toplumsal, bireysel ve sosyal sonuçları olan bir kavram olarak literatürde yer almaktadır. Özellikle sanayi devriminden sonra engelli kavramı toplumsal hayatta daha sık kullanılır hale gelmiştir. Sanayi devrimi ile birlikte doğuştan kaynaklanan engelin dışında iş kazaları sonucunda oluşan engel oranlarında artış olmuştur. Engelliler dezavantajlı bir grup olarak sosyal politikaların kapsamına girmiştir. Sanayi ve teknolojik gelişmeler, sosyal hayatın hareketliliği ve toplumsal gelişmeler sonucu evlerine kapanan engellilerin toplumla bütünleşme talepleri toplumun diğer katmanları tarafından görünür hale gelmiştir"[4]. Bu çalışmada tam bu noktaya değinmektedir. Engellilerin toplumla kaynaşması ve ev bütçelerine az da olsa bir katkı sağlamaları adına bu çalışma oldukça önemlidir.

Ulusal Engelliler Veritabanı'nda kayıtlı, adresi, engel grubu ve engelli sağlık kurulu rapor bilgileri bilinen, yaşayan toplam 1.869.521 engelli bireye ilişkin dağılımlar Çizelge 1'de verilmiştir [5].

Çizelge 1.Engel grubuna göre birey sayıları (The numbers of individual according to disability groups)

Engel Grubu	Birey Sayısı
Görme	281.604
İşitme	210.531
Dil ve Konuşma	52.286
Ortopedik	420.964
Zihinsel	562.319
Ruhsal ve Duygusal	220.679
Süreğen Hastalıklar	1.025.579
*TOPLAM	1.869.521

*Bir kişi birden fazla gruba dâhil olabileceğinden, satırlar toplamı "TOPLAM" satırından büyük çıkabilir.

Çizelge 1'de görüldüğü gibi çalışmamızın odak noktasında bulunan yürüme engelli bireyler, ortopedik engel grubuna dâhildir ve sayıları da oldukça yüksektir. Bu bireylerin istihdamları için birçok çalışma yapılmışsa da yeterli olamamıştır. Son 5 yıla ait kamu kurumlarında ve özel sektörde engelli kotasında istihdam edilen işçilerin yıllara göre dağılımı Çizelge 2'de verilmiştir [6].

Çizelge 2. Kamu kurumlarında ve özel sektörde engelli kotasında istihdam edilen işçilerin yıllara göre dağılımı (The distribution of workers employed in public institutions and the private sector by years)

Yıllar	Başvuru	İşe Yerleştirme		
		Kamu	Özel	Toplam
2014	49.823	-	-	19.847
2013	-	-	-	34.467
2012	83.955	-	-	35.531
2011	35.151	468	37.982	38.349

2010	36.144	295	31.962	32.257
2009	40.519	545	25.860	26.405

Çizelge 2, işçilere ait bir analizi ortaya koysa da, devlet kadrolarında memur sıfatı ile çalışan yürüme engelli bireylerin sayısı da oldukça az ve yapabilecekleri iş oldukça sınırlıdır. Bu gruba yönelik açılan iş sahaları genellikle oturarak yapılabilecek işler şeklindedir. Oysaki bu bireylere dönük aktif iş hayatına katılabilmeleri adına, geliştirilecek uygun makine-teçhizatlar ile daha farklı ve yeni iş sahalarının açılmasına ihtiyaç vardır. Bu durumu en iyi açıklayan veri ise; 2014 yılı Ağustos sonu itibarı ile İŞKUR'a kayıtlı 118.973 engelli kişinin bulunmuş olmasıdır[6]. Bu kadar insan işsizdir ve bu ülke ekonomimiz içinde büyük bir problem teşkil etmekte olup bu insanların dışlanmadan iş hayatına çekilmeleri gerekmektedir. Tüm bu veriler incelendiğinde ortaya çıkan tablo; ülkemizde çok sayıda engelli bireyin olduğu fakat bunların büyük kısmının çalışabilecekleri bir işin veya da kullanabilecekleri makine-teçhizatın olmaması şeklindedir.

Pedallı makinelerin kontrol sistemi konusunda literatür incelendiğinde, akademik anlamda herhangi bir çalışmaya ulaşılamamış fakat ticari anlamda yurtdışında birtakım patent çalışmalarının olduğu gözlemlenmiştir. Örneğin dikiş makinelerinin kontrolü konusunda yapılan bir çalışmada, dikiş uzunlukları ve bitiş noktalarının kontrolü, malzemenin kenarlarına duyarlı algılayıcılar tarafından tespit edilmekte ve denetleyici olarak bir mikrodenetleyici kullanılmaktadır [7]. Bu sistem oldukça teknolojik olsa da pedal kontrollüdür ve engelli bireylerin kullanımı için uygun değildir. Pedallı dikiş makinesi motoru ve kontrol devresinin incelendiği bir diğer çalışmada ise, fırçasız doğru akım motorunun tahrik sistemi ele alınmıştır. Buna göre motor hızlandığı ve daha önce belirlenmiş bir hızda, kapalı döngü modunda çalışırken, dinamik fren vasıtasıyla durdurulması için hızlı bir şekilde yavaşlatılması sağlayan bir tasarım amaçlanmıştır [8]. Bu çalışmada kablosuz kontrol üzerine değildir ve engelli bireylerin kullanımı için uygun bir tasarım değildir.

Yapılan bu çalışmada ise, hazır giyim, örgü, çorap vb. gibi sektörlerde kullanılan ve pedal ile kontrol edilen mevcut tüm makinelere takılabilecek, bu makinelerin uzaktan kontrol edilebilmesini sağlayabilecek ve böylelikle yürüme engelli bireylerinde bu tür makineleri kullanmalarına izin vererek istihdamları adına bir farkındalık uyandıracak, kumanda bileklik sistemi(KBS) geliştirilmiştir. Çalışmamız bu özelliklerinden dolayı oldukça özgün olmakla birlikte akademik alanda bu konudaki önemli bir boşluğu dolduracağına inanılmaktadır.

2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (THE IMPORTANCE OF STUDY)

Günümüz makine teknolojisinde önemli gelişmeler yaşanmakta ve çok hassas özellikli ürünler tasarlanmaktadır. Yapılan tasarımların yenilikçi yönlerinin temel

amacı daha kaliteli, hassas ve üretimi (verimi) artırıcı olmalarıdır. Genelde firmalar teknolojik yatırımlarda bunlara dikkat ederek ar-ge çalışmaları yapmaktadırlar. Bu amaçla yapılan ar-ge çalışmaları makinelerin kontrol sisteminde yapılan iyileştirmelerden farklı olarak fonksiyonlarını da geliştirme amacı taşır. Fakat kontrol sistemi de bir cihaz için oldukça önemlidir. Zira aynı makinede farklı özelliklere sahip insanlarında kullanılabileceği esnekliği sağlamak, o makinedeki üretimin artması ve üretimin devamlılığı adına çok önemlidir. Çünkü özellikle dikiş – nakış gibi insan gücüne dayalı üretim yapılan sektörlerde farklı kontrol mekanizmalarına sahip ve kullanıcının işini kolaylaştıran cihazlar, her zaman için üretime pozitif katkı sağlamışlardır. Bu durum birçok sektör için geçerlidir.

Konfeksiyon, örgü, çorap gibi sektörler dünyada insan gücünün en çok kullanıldığı sektörlerdir. Ülkemizde de bu sektörler gelişmiş bir düzeyde olup ihracat noktasında temel iş kollarının başında gelmektedir. Bu sektörlerde farklı amaçlar için kullanılan çok çeşitli makine türleri bulunmaktadır, fakat kullanılan makinelerin kontrol mekanizmaları aynıdır. Yani dikiş fabrikalarında kullanılan makinaların tamamı pedal sistemi ile ayaktan kumanda edilmektedir. Şekil 1’de dikim sanayinde oldukça yaygın kullanıma sahip pedallı bir dikiş makinesi görülmektedir.



Şekil 1. Pedallı dikiş makinesi (treadle sewing machine).

Pedal kontrollü sistemlerde kontrol işlemi, pedala basılmak suretiyle makine motorunun çalıştırılması ve pedalin bırakılması ile de motorun durdurulması şeklindedir. Motor hızı, iğne konumu vb. parametreler ise makine üzerinde bulunan butonlar aracılığı ile gerçekleştirilir. Ayağın devamlı aktif olarak kullanıldığı bu tip pedallı makinelerde, kullanıcının ayağını çok hassas hareket ettirebilmesi ve bu makinelerde uzun süre çalışabilmesi gerekir. Oysa aynı makine saatlerce çalışan bir işçi, devamlı pedala basıp bırakacak ve dolayısıyla ayağında bir yorgunluk ve uyuşma meydana gelecektir. Böylelikle çalışan personelin bu iş için harcayacağı enerji de oldukça fazla olacaktır. Ayrıca makinede, kumanda sisteminde mekaniksel aksam arıza yapabilmekte ve makine bir süre çalışmamaktadır. Böyle bir durum, firma sahipleri için kabul edilemez bir durumdur. Çünkü bir makinenin çalışmaması, firma sahibinin üretimine ciddi anlamda ket vurabilmektedir. Benzer şekilde ayağın komut verme süresi de oldukça önemli bir konudur. Zira pedal ile kumanda edilen overlok makineleri gibi hassas makinelerde iğne-ilmik zamanlamasının oldukça iyi ayarlanması

gerekmektedir. Aksi durumda iğne kırılmaları meydana gelebilmekte ve üretim yine aksayabilmektedir. Tüm bu olumsuzlukların yanında, ayaktan kontrol edilen pedallı makinelerinin en büyük dezavantajı, bu makinelerin hiçbir yürüme engelli birey tarafından kullanılmamasıdır. Gerek doğuştan gelen, gerekse de kaza, hastalık (omurilik hastalıkları gibi.) vb. durumlar sonucu ayaklarını kullanamayan veya kısıtlı fonksiyona sahip yürüme engelli bireyler; hazır giyim, örgü, çorap vb. gibi sektörlerde kullanılan pedallı makinelerin hiçbirini kullanamamakta ve bu sektörlerde kendileri için çok az bir çalışma alanı (işçi sınıfı dışında, sekreterlik vb. pozisyonunda) bulabilmektedirler. Bu problemleri durumdan yola çıkılarak, dezavantajlı grup olan yürüme engelli bireylerinde bu makineden faydalanabilmelerinin, değerlendirilmesi gereken bir konu olduğu düşünülmüştür. Geliştirilen KBS ile fabrikalardaki makineler iki konumlu olarak çalıştırılabilecek, böylelikle de daha fazla insanın o makineyi kullanabilmesine imkân sağlanmış olacaktır. Pedal aksamında oluşabilecek mekaniksel bir sorundan dolayı makine atıl kalmayacak, üretimine devam edecektir. Böylelikle proses bütünlüğü de sağlanmış olacaktır.

3. KBS TASARIMI VE KULLANIMI (THE DESIGN AND USE OF WCS)

Pedal kumandalı makinelerde, kullanıcının dikiş işlemini yapabilmesi için iki elini kullanması beklenmektedir. Tasarımdaki en önemli nokta da burasıdır. Geliştirilen sistemde avuç içinde kullanılan kumanda butonu, elin fonksiyonelliğini engellemeyecek şekildedir. Avuç içerisine yerleştirilmiş küçük bir buton ile makine kumanda edilebilmektedir. Bu buton, kullanıcıyı rahatsız etmeyecek ve elin diğer işlevlerini engellemeyecek şekilde yerleştirilmiş ve bilekliğin bulunduğu elde bulunan istenilen herhangi parmak ile de kullanıcıyı yormadan işlev kazandırılabilmesi sağlanmıştır. Engelli birey, KBS’yi bileğine takar ve bileklik üzerinde bulunan buton aracılığı ile makineye komut gönderir.

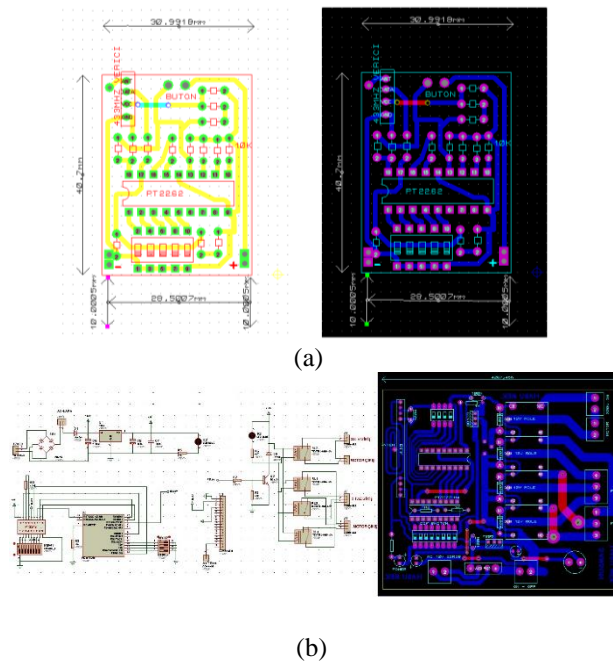
3.1. Haberleşme Protokolü (Communication Protocol)

Gerçekleştirilen kumanda bileklik sistemi haberleşme protokolü olarak RF (Radyo Frekans) haberleşme kullanılmıştır. KBS ve makine arasındaki iletişim kablosuz olarak gerçekleşmektedir. KBS üzerinde bulunan verici kart; 12v pil, şifreleme anahtarı, verici parça (433MHz) ve diğer elektronik parçalardan oluşmaktadır. Burada önemli olan nokta, pil kullanım ömrüdür. Verici devrede kullanılan zener diyotlar ile butona farklı bir fonksiyon yüklenmiş ve pil kullanım süresi uzatılmıştır. Yani butona basılmadığı sürece devre hiçbir enerji harcamazken, butona basıldığında hem devre enerjilenmekte hem de mikrodenetleyiciye bir girdi komutu verilmektedir. Kart boyutları(3x4cm) ise oldukça küçük tutulmuştur.

Alıcı devre üzerinde ise, mikrodenetleyici, kod çözücü entegre, regülatör, röle sürmede kullanılan mosfet

transistor, röle takımı ve diğer elektronik elemanlardan oluşmaktadır. Vericiden gelen kodlanmış bilgi, alıcı devrede bulunan mikro denetleyici yardımı ile çözülmekte ve röle kontak konumları değiştirilmektedir. Buradaki önemli nokta, farklı alıcı ve verici kartların aynı ortamda birbirlerini etkilemeden sorunsuzca çalışmasıdır. Çünkü her bir verici karttan gelen bilgi şifrelenerek gönderilmekte ve geliştirilen yazılım ile sadece kendi alıcısında çözülmekte çalışmaktadır. Böylelikle, fabrika ortamındaki birçok cihaz aynı anda ve sorunsuzca kontrol edilebilmektedir.

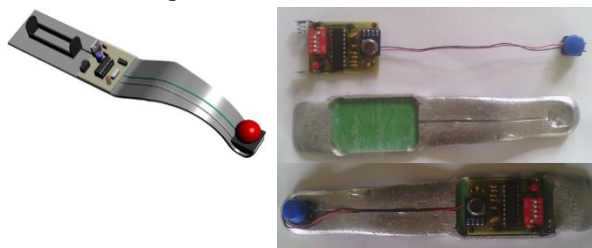
Sisteme ait verici ve alıcı kartlar Şekil 2’ de görülmektedir.



Şekil 2.KBS verici (a) ve alıcı (b) kartlar (WCS transmitter (a) and receiver (b) cards)

3.2. Bileklik İskeletinin Oluşturulması (The creating of the frame of wristbands)

Bileklik sisteminin iskeleti alüminyum esaslı alaşım malzemesinden dökülmüş ve CNC makinesinde bilek açığı ve şekillerine göre işlenmiştir. Böylelikle ergonomik bir tasarım ortaya çıkmıştır. Daha sonra da verici kart, bileklik iskeletindeki yuvaya yerleştirilmiştir. Bu durum Şekil 3’ de görülmektedir. Bileklik iskeleti; bileği yormama, hafiflik, rahat kullanılabilirlik, estetik görünüm, elin fonksiyonelliğini engellememe gibi özelliklere sahiptir.

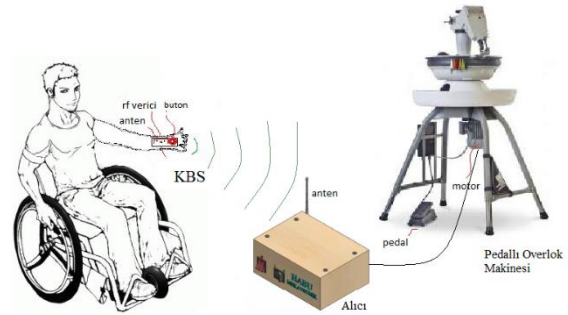


(a)

(b)

Şekil 3. KBS iskeleti son hali, tasarım (a) ve devre montaj aşaması(b) (The final frame of WCS (a) and circuit board assembly (b))

Bu çalışmada kullanılan KBS, elektromekanik kol mekanizması şeklinde tasarlanmıştır. Bu tasarım, makine üzerine alıcı bir sistem, robot kol üzerine verici parça ve alüminyumdan dökülmüş, CNC’ de işlenerek ergonomik bir tasarıma sahip bileklik iskeleti parçalarından oluşmaktadır. Geliştirilen sisteme ait çalışma prensibi Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4. Tasarlanan sistem çalışma prensibi (The working principle of designed system)

Buna göre, makineyi kullanacak yürüme engelli birey, KBS’yi bileğine takar ve iğnesini ayarladıktan sonra makineyi çalıştırır. Kumaşı tezgâha yerleştirir ve motora ilk hareketi vermek için bileğinde takılı halde bulunan KBS üzerindeki butona parmağı ile dokunur. Bu anda makine motoru harekete geçecek ve iğne kumaş üzerinde yukarı aşağı hareket edecektir. Dikiş işlemi başlamış demektir. Kullanıcı birleştirmek istediği kumaşları diktikten sonra kumaş pozisyonu değiştirmek üzere motoru durdurmak için KBS üzerinde bulunan butona dokunacak ve makineyi durduracaktır. Kumaş ve iğnesini ayarladıktan sonra aynı şekilde KBS üzerindeki buton yardımı ile iğneyi harekete geçirecek ve istediği anda da durdurabilecektir. Dikiş işlemi bu periyotta devam edecektir.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, hazır giyim, örgü, çorap gibi sektörlerde kullanılan tüm pedallı makinelerle uyumlu çalışabilen ve bu makineleri kablosuz kumanda edebilen bir kumanda sistemi geliştirilmiştir. Dökümü gerçekleştirilen ve CNC' de işlenmiş KBS iskeleti, Şekil 5' de görüldüğü gibi, fabrika ortamında bulunan toz vb. maddelerden olumsuz etkilenmemesi için bir kumaş kılıf içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 5. KBS verici (WCS Transmitter).

Yapılan bu çalışma ile hem bir teknoloji iyileştirmesi yapılmış hem de bu iyileştirmenin neticesi olarak yürüme engelli bireylerin istihdamına imkân sağlanmıştır. Sonuç olarak yapılan bu çalışmanın bu yönüyle de sosyal sorumluluk projesi olduğu düşünülmektedir. Geliştirilen cihazın kullanılabileceği makine tiplerinden bazıları aşağıda verilmiştir;

- Konfeksiyon, örgü, çorap,
- Düz dikiş makineleri,
- Zig zag,
- Overlok,
- Reçme makineleri,
- İlik, düğme makineleri,
- Kol takma makineleri,
- Punto dikiş makineleri,
- Zincir dikiş makineleri,
- Deri,
- Çanta,
- Döşeme,
- Çuval makineleri,
- Baskı makineleri,
- Her türlü pedalla çalışan benzer makineler.

5. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Yapılan denemeler ve analizler sonucunda geliştirilen cihazın, pedallı makinelere montajının oldukça basit olduğu görülmüştür. Öyleki KBS' nin triko makinesine bağlanması, 3dk, dikiş makinesine bağlanması ise yaklaşık 4 dk. sürmüştür. Geliştirilen cihaz, hem 220V 50HZ ile çalışan makinelere hem de 380V Üç faz ile çalışan makinelere bağlanabilme özelliğine de sahiptir. Ayrıca cihazın makineye bağlanması ile pedal kontrolü iptal edilmemiş, istenildiği takdirde pedallı kontrole de imkân sağlamıştır. KBS, farklı mesafelerden (2-4m) rahatlıkla kontrol işlemini gerçekleştirmiştir. Bilindiği gibi bu tür fabrikalarda birden çok makine aynı ortamda

yakın mesafede çalışmaktadır. Aynı ortamda bulunan 2 kumanda bilekliğinde birbirlerini etkilemeden sorunsuzca çalışmaları, gerçekleştirilen denemeler sonucu görülmüştür. Çünkü her bir KBS üzerindeki sinyal kodlanmış ve bu kod ancak kendi alıcısında bulunan mikrodenetleyici ile çözülmektedir. Çalışmada önemli bir konu da KBS'de bulunan pil ömrüdür. Bu durum daha tasarım aşamasındayken düşünülmüş ve tasarım buna göre gerçekleştirilmiştir. Buna göre butona basılmadığı sürece pil aktif olmaz ve boşa enerji harca-maz. Butona basıldığında ise hem kart enerjilenmekte hem de motoru harekete geçirecek kodlanmış sinyaller, alıcı karta gönderilmektedir. Denemeler farklı bireyler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu bireyler ilk başlarda pedal sistemine alıştıklarından, KBS için acemilik çekmişlerse de kısa bir sürede uyum sağlayarak başarılı bir şekilde dikiş işlemini gerçekleştirmişlerdir. Gerçekleştirilen bu proje, denemeleri gerçekleştirdiğimiz firma yetkililerinden de tam not almıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Teknogirişim sermayesi desteği projesi kapsamında 'TGSD: 0053.TGSD.2014' proje numarası ile desteklenmiştir. Ayrıca KOSGEB – Samsun, Pelin Triko ve Yilro Giyim Sanayi ve çalışanlarına desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Mansour M., Schaufelberger W., "Software and Laboratory Experiments Using Computers in Control Education", *Control Systems Magazine-Ieee*, 9(3): 19-24, (1989).
2. Konukseven İ., Kaftanoğlu B., Balkan T., "Multisensor Controlled Robotic Tracking and Automatic Pick and Place", *Intelligent Robots And Systems*, 1997. Iros '97., *Proceedings Of The 1997 Ieee/Rsj International Conference ON*, 3: 1356-1362, 7-11 (1997).
3. Konukseven İ., Kaftanoğlu B., "Multisensor Controlled Robot System for Recognizing and Tracking Moving Multiple Objects", *Journal Of Robotic Systems*, 16(11): 651-665, (1999).
4. Genç Y., Çat G., "Engellilerin İstihdamı ve Sosyal İçerme İlişkisi", *Akademik İncelemeler Dergisi (Journal of Academic Inquiries)* 8(1): 363-393, (2013).
5. T.C. Aile ve sosyal politikalar bakanlığı, engelli ve yaşlı hizmetler genel müdürlüğü, engelli bireylere ilişkin istatistiksel bilgiler kitapçığı, Ekim, (2014).
6. <http://www.iskur.gov.tr/kurumsalbilgi/istatistikler.aspx>, en son erişim: 30.04.2015, 12:02.
7. Charles R. M., Elmer N. L., Don D. I., Stephen S. T., "Control system for sewing machine", Patent, Yayınlanma numarası: US4403558A, yayın tarihi: 13 Eyl 1983.
8. Bernstein B., Crawshaw J., Mc Curry M., "Sewing machine motor and control circuit", Patent, yayınlanma numarası: US3832613 A, yayın tarihi: 27 Ağu 1974

Şebeke Bağlantılı Eviriciler için LLCL Filtre Tasarımı; Detaylı Bir Performans Analizi

Murat KARABACAK^{1*}, Fuat KILIÇ², Bilal SARAÇOĞLU³, Ali Fuat BOZ¹, Abdullah FERİKOĞLU¹

¹Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya

²Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 41380, Kocaeli

³Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81100, Düzce

(Geliş / Received : 08.08.2015 ; Kabul / Accepted : 01.10.2015)

ÖZ

Şebeke bağlantılı eviricilerde, şebekeye aktarılan akımların toplam harmonik bozunumunun %5'in altında olması gerekmektedir. Bu amaçla çıkış filtreleri kullanılmaktadır. Toplam harmonik bozunumundan başka filtrenin üzerindeki gerilim düşümü ve filtrenin reaktif güç tüketimi için de tasarım koşulları sağlanmalıdır. Bu koşulları sağlamak için çeşitli filtre tasarım yöntemleri literatürde sunulmuştur. Bu çalışmada, en önemli filtre tasarım yöntemleri ele alınmış ve L, LCL ile LLCL filtre tasarımları arasında bir performans analizi yapılmıştır. Sonuç olarak, LLCL filtrenin, bazı riskli noktalar dikkate alınmak şartıyla, daha yüksek performans ve daha düşük maliyet sağladığı ortaya çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: L filtre, LCL filtre, LLCL filtre, Aktif Söndürme, Evirici

LLCL Filter Design for Grid Connected Inverters; a Detailed Performance Analysis

ABSTRACT

Currents injected into grid need to have a total harmonic distortion below 5% in grid connected inverters. To this aim, output filters are employed. For these filters, design conditions other than total harmonic distortion for voltage drop over the filter and reactive power consumption of the filter have to be also fulfilled. In literature, some filter schemes have been proposed to satisfy these conditions. In this study, the most important filter types are handled and a performance analysis between L, LCL and LLCL filter was implemented. Consequently, it is concluded that LLCL filter has higher performance and lower cost, on the condition that some risky points are considered.

Keywords: L filter, LCL filter, LLCL filter, Active Damping, Inverter

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Şebeke bağlantılı eviriciler, kesintisiz güç kaynakları, 4 bölgeli motor sürücüler, aktif güç filtreleri, güneş ve rüzgâr enerjisi sistemlerinde kullanılmaktadır [1-12]. Çıkış filtreleri şebeke bağlantılı eviricilerin önemli ve temel bir bileşenidir. Bu filtreler olmadan şebekeye güç

filtreler, Şekil 1'de verilmektedir. Şekil 1'de, filtrelerin girişi "i alt indisli gösterimler" eviricinin çıkışına, filtrelerin çıkışları ise "o alt indisli gösterimler" şebekeye bağlanır. Filtreleri bir transfer fonksiyonu olarak düşünürsek, giriş evirici gerilimi (V_i), çıkış ise şebeke akımı (i_o) olmaktadır. Bu filtreler arasında L



Şekil 1. Şebeke bağlantılı eviricilerde kullanılan çıkış filtreleri (a) L filtre (b) LC filtre (c) LCL filtre (d) LLCL filtre
(Output filters used on grid connected inverters (a) L filter (b) LC filter (c) LCL filter (d) LLCL filter)

aktarımı yapmak mümkün değildir. Çıkış filtresi olarak L [7, 12, 17-19], LC [14-16], LCL [1-12] ve LLCL [13]

filtre en basit çözümdür ve tasarımı diğer filtrelerle göre daha kolaydır. Fakat aynı toplam harmonik bozunumu sağlamak üzere farklı filtre tasarımları yapıldığında, en maliyetli olan filtre L filtredir çünkü büyük endükstans değerleri gerektirmektedir [7,12].

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: muratkarabacak@sakarya.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 251-260

Ayrıca yüksek endüktans değerleri kullanıldığında filtrede düşen gerilim artmaktadır ve gerekli enerji aktarımını yapabilmek için DC bara değerinin artırılması gerekmektedir ki bu da anahtarlama kayıplarını artırır [7,12,17-19]. Bu durum L filtresinin ikinci büyük sakıncasını oluşturmaktadır. Filtrenin boyutunu düşürmek ve böylece maliyeti azaltmak, filtre üzerinde düşen gerilimi minimize etmek ve ayrıca evirici çıkışındaki enerji kalitesini yükseltmek üzere LC veya LCL filtreler önerilmiştir [14-16,1-12]. L filtreye benzer olarak, diğer bir geleneksel çözüm LC filtredir. Fakat genellikle şebeke bağlantısız sistemlerde kullanılır, çünkü şebeke kendi endüktansına (Şekil 2'deki L_g) sahiptir ve LC filtreye seri durumdadır. Bu durum ortaya LCL filtre çıkarmaktadır, özetle LC filtreler şebeke bağlantılı olarak tasarlanmazlar [12, 14-16,20-21].

Günümüzde en yaygın kullanıma LCL filtreler sahiptir, çünkü şebeke bağlantı standartlarını oldukça küçük boyut ve düşük maliyet ile sağlamaktadır. Aynı kıstaslar altında L filtre ile karşılaştırılacak olursa, LCL filtre oldukça küçük boyutlu, düşük maliyetli ve yüksek performanslı bir çözümdür. Fakat tasarımları zordur ve şebeke bağlantılı kapalı çevrim sistemi kararlı halde tutmak için tam durum geri beslemeli doğrusal olmayan denetleyiciler veya karmaşık sönümleme şemaları gerekmektedir [11]. Bu şemalar kullanılsa bile, yüksek şebeke endüktansı değerleri için filtrenin performansı düşer, en kötü durumda ise kararsızlığa sürüklenir. Şekil 2'de bir LCL filtresinin şebeke ve eviriciye bağlantısı

LCL filtrede herhangi bir parametrede meydana gelebilecek %20 civarında bir değişim rezonans frekansını da yaklaşık %20 değiştirir. Fakat LLCL filtrede, rezonans endüktansında " L_3 " meydana gelebilecek %20 civarında bir değişim, rezonans frekansının yaklaşık iki kat değişmesine ve LLCL filtresinin performansının LCL filtresinin altında kalmasına neden olur [13]. Bu durumda, LLCL filtresinin parametre değişimlerine LCL filtreden önemli ölçüde daha duyarlı olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu ve diğer sebeplerden anlaşıldığı gibi, LLCL filtreler önemli üstünlükler sağlamasına rağmen, kararlı bir performans sağlaması LCL filtrelerden daha büyük riskler içermektedir.

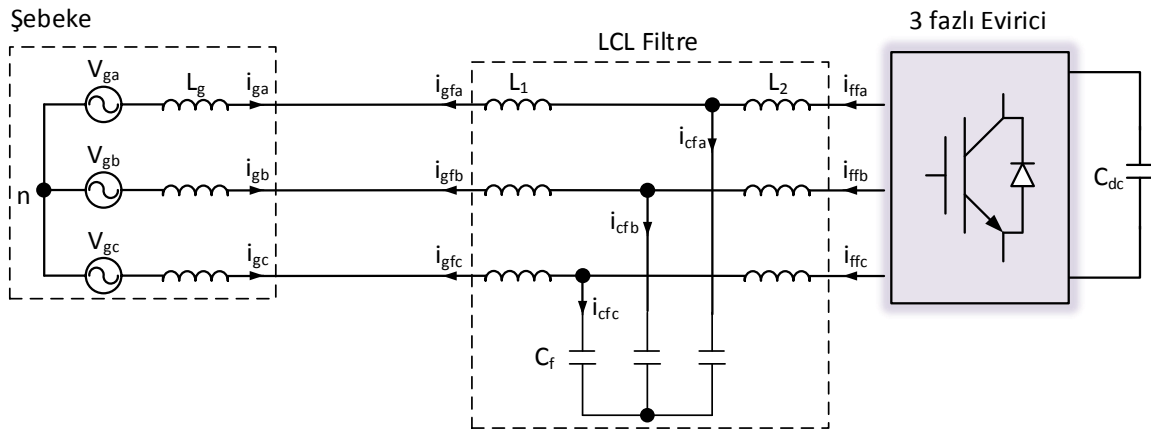
Bu çalışmada şebeke bağlantılı bir üç fazlı evirici için, L, LCL ve LLCL olmak üzere üç farklı filtre tasarımı ve aralarında bir performans analizi yapılmıştır. Dikkat edilmesi elzem olan yukarıda da bahsedilmiş olan sakıncalarla birlikte, en düşük boyut ve en yüksek harmonik performans LLCL filtre ile elde edilmiştir.

Çalışmanın bundan sonraki kısmında, sırasıyla, L, LCL ve LLCL filtre tasarımları, örnek bir durumla birlikte verilmiştir. Ardından simülasyon çalışmaları ve son olarak analiz sonuçları verilmiştir.

2. FİLTRE TASARIMLARI (FILTER DESIGNS)

Sırasıyla L, LCL ve LLCL filtre tasarımları aşağıda verilmektedir. Filtre tasarımlarında, literatürde kabul görmüş kıstaslar ortaktır ve aşağıdaki gibidir.

I. Filtrede düşen gerilim şebeke faz geriliminin



Şekil 2. LCL filtresinin şebeke ve eviriciye bağlantısı (LCL filter connection to grid and inverter)

verilmektedir.

LLCL filtreler anahtarlama frekansından kaynaklanan dalgalanmaları LCL filtreye göre daha iyi süzmektedir. Diğer bir deyişle, anahtarlama frekansına yaklaşık sıfır empedans göstererek, anahtarlama frekansındaki (frekans modülasyonu değerindeki " m_f " ve yan bantlarındaki) harmonikleri daha güçlü bir şekilde bastırmaktadır [13,22]. Bununla birlikte, m_f 'nin katları ve yan bantlarındaki harmonikleri ise LCL filtreden daha iyi bastıramamaktadır [13].

%10.0'undan fazla olmamalıdır. Bu kıstasın amacı DC bara gerilimin çok artmamasını sağlamak ve anahtarlama kayıplarını düşük tutmaktır.

II. Güç faktörü %99.5'in üstünde olmalıdır.

III. Tablo 1'de verilen "IEEE STD 519 CURRENT HARMONIC LIMITS" standardı sağlanmalıdır. Yüksek güç değerleri için, yani $I_{SC}/I_L < 20$ (maksimum kısa devre akımının (I_{SC}), maksimum yük akımı (I_L) değerinin 20 katından düşük olduğu) durumlarda, faz akımlarında oluşacak %5.0 THD bu

standardı sağlamaktadır. Bu standardın ana ölçütü, 15 – 30 dakika boyunca Ortak Bağlantı Noktası (PCC)'ndan çekilebilecek (anlık olmayan) I_L akımının, maksimum kısa devre akımına oranıdır. Bu oran büyüdükçe ortak bağlantı noktasına bağlanan yükün güç değeri azalıyor demektir ki bu

Kararlı durumda I_L her zaman I_1 'den büyüktür. Bu durum şunu ifade etmektedir: %5 THD oranı sağlandığında %5 TDD oranını da sağlamış olmaktadır. Bu yüzden TDD yerine her zaman THD amaç olarak konulmaktadır [2,11]. Burada, literatürdeki örnekleri dikkate alarak [2,11], ayrıca güç kalitesini

Çizelge 1. IEEE STD 519 Akım harmonik limitleri, 120 V ile 69000 V arası genel dağıtım sistemleri için (IEEE STD 519 Current harmonic limits for general distribution systems, 120 V through 69000 V)

Yük akımının yüzdesi olarak maksimum akım harmonik bozunumu						
Tek sıralı harmonikler						
%*	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
$I_{SC}/I_L < 20$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < I_{SC}/I_L < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < I_{SC}/I_L < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < I_{SC}/I_L < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
$1000 < I_{SC}/I_L$	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Çift sıralı harmonikler yukarıda tek eşdeğerlerinin %25'i ile sınırlandırılmıştır.						
Akımda DC seviyeye izin verilmemektedir. * Tüm güç üretim elemanları, gerçek I_{SC}/I_L değerine bakılmaksızın tabloda verilen akım bozunum oranları ile sınırlandırılmıştır.						
PCC: Ortak bağlantı noktası, I_{SC} : PCC'ndaki maksimum kısa devre akım değeri I_L : PCC'ndan 15 – 30 dakika boyunca çekilebilecek (anlık olmayan) maksimum yük akımı değeri TDD: Toplam talep bozunumu						

durumda yükün şebekeye zarar verme oranı da düşmektedir. Zaten tabloda da görüldüğü gibi, güç değerleri küçüldükçe akım harmonik limitleri de artmaktadır. Diğer bir ölçüt olarak, THD yerine Toplam Talep Bozunumu (TDD) seçilmesinin nedeni de budur. Böylece küçük güç değerlerine sahip müşteriler haksız cezalandırmadan korunmuş olmaktadır. THD'de harmoniklerin etkin değerlerinin karekök içinde karelerinin toplamı temel dalgaya oranlanır. TDD ise aynı toplam yukarıda bahsedilen maksimum yük akımına oranlanır.

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_L}$$

Burada, alt indisli I harfleri ilgili harmoniklerin etkin değerlerini temsil etmektedir.

yükseltme amacını da güderek, %3.0 THD amaçlanmıştır.

Filtre tasarımında kullanılan Y bağlı güç sisteminin parametreleri ise aşağıdaki tabloda verilmektedir. DC bara gerilimi pasif diyotlu doğrultmanın %30 fazlası kadar seçilmiştir

Çizelge 2. Güç sistemi parametreleri (Parameters of power system)

Parametre	Değer	Parametre	Değer
Üç faz gücü (P_n)	3750 W	Şebeke frekansı (f_n)	50 Hz
Tek faz gücü (P_1)	1250 W	DC bara (V_{dc})	350 V
Şebeke faz gerilimi (V_n)	110 V	Anahtarlama frekansı (f_{sw})	10 kHz

2.1. L Filtre Tasarımı (L filter design)

L filtre tasarımında kullanılan Darbe Genişlik Ayarı (DGA) yöntemine en önemli parametredir. Referans [12]'de verildiği gibi filtre tasarımı yapılır.

$$L_1 \geq \frac{V_{h\%} \cdot V_n^2}{\omega_n \cdot m_f \cdot P_1 \cdot THD_i}$$

Burada, ω_n şebeke açısıl frekansı ve m_f frekans modülasyonudur. Sinüzoidal DGA için en kötü durum senaryosu ele alındığında, m_f ve katlarının yan bantlarındaki harmoniklerin toplamının temel dalgaya oranı, $V_{h\%} = 0.49$ olarak alınmıştır [12]. Bu durumun DC bara gerilimine de bağlı olduğu unutulmamalıdır, DC bara gerilimi arttıkça hesaplanan değer de artacaktır. Buradan L filtre değerinin alt sınırı aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Ayrıntılar için referans [12]'ye de bakılabilir.

$$L_1 \geq \frac{0.49 \cdot 110^2}{2\pi \cdot 50 \cdot 200 \cdot 1250 \cdot 0.03} \geq 2.5mH$$

2.2. LCL Filtre Tasarımı (LCL filter design)

LCL filtre tasarımında THD, reaktif güç ve güç faktörü değerlerinin üç faz için yaklaşık formülleri kullanılarak grafik tabanlı nümerik bir yaklaşım kullanılır. Bu yaklaşım literatürde önerilmiş en son ve en gelişmiş tasarım yöntemlerinden biridir [11,25]. Bu bağlamda reaktif güç;

$$q = \frac{(r_q - 1)(1 + r_l)(r_f f_n)}{f_{sw} \sqrt{r_q} \sqrt{r_l}}$$

olarak verilir. Burada, r_q değişkendir ve 1 seçildiğinde, sistemde reaktif güç sıfır çıkar. r_l ise L_1 ve L_2 arasındaki orandır, yenilenebilir enerji sistemleri ve kesintisiz güç kaynakları gibi uygulamalarda değeri optimum olarak 1 seçilir [11]. r_l 'nin değeri ise optimum olarak 3.12 seçilir. Güç faktörü (PF) ise reaktif güce (q) bağlı olarak

aşağıdaki gibi verilir.

$$PF = 1 / \sqrt{1 + q^2} \tag{1}$$

L_1 ve L_2 'nin toplamı olarak, toplam endüktans değeri (L_T) ise;

$$L_T = \frac{(\sqrt{3}V_n)^2}{P_n \cdot \omega_n} \frac{r_f f_n (1 + r_l)}{f_{sw} \sqrt{r_l r_q}}$$

“Filtre kondansatörü akımı geri besleme” sönümleme yöntemine göre $r_f = 3.12$ optimum olarak seçilir [11,25,26]. Buradan uzay vektör DGA için faz akımlarının THD'si;

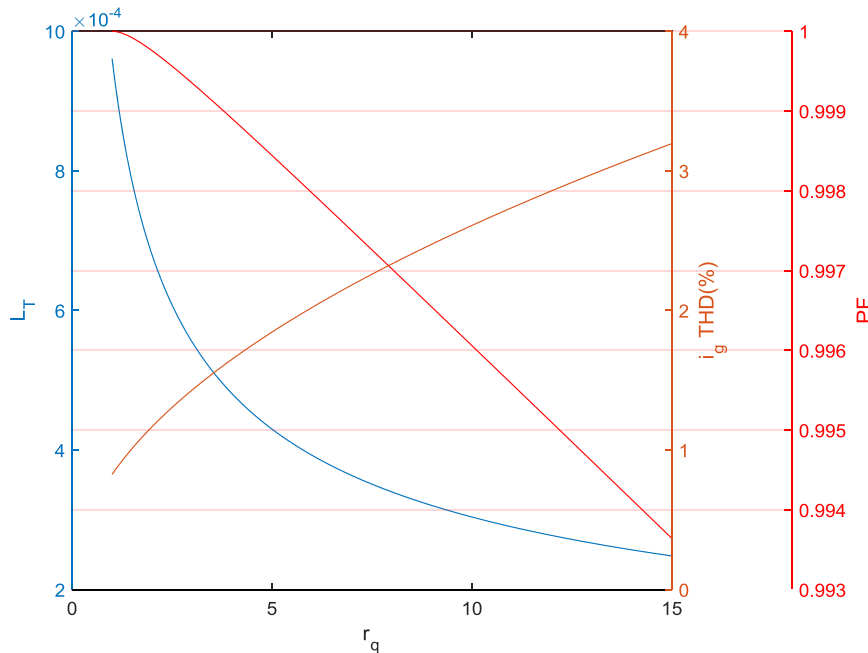
$$THD_i = \left(\frac{\pi V_{Lk} \sqrt{3}}{12 I_{Lk} V_n} \right) \left(\frac{\sqrt{r_q}}{r_f} \right) \left(\frac{\sqrt{r_l}}{1 + r_l} \right) \left(\frac{1}{(1 - 6/m_f)^2 - (1/r_f^2)} \right) \sqrt{\frac{3}{2} m^2 - \frac{4\sqrt{3}}{\pi} m^3 + \frac{9}{8} \left(\frac{2 - 9\sqrt{3}}{8\pi} \right) m^4} \tag{2}$$

olarak bulunur [11,25,26]. m , modülasyon oranıdır [25,26]. Eşitlik (5)'de bulunan L_T değerine göre, filtre kondansatörü C_f ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_f = \frac{r_f^2 (1 + r_l)^2}{4\pi^2 L_T f_{sw}^2 r_l}$$

Yukarıda verilen analiz temelinde, Şekil 3'teki grafik elde edilmekte ve grafik üzerinden değerler seçilerek aşağıdaki gibi tasarım tamamlanmaktadır (3)

Yukarıdaki grafikten, şebeke akımlarının THD'si %3.0 seçildiğinde, PF = %99.5 ve $L_T = 0.0002644$ H olarak sonuçlanır. Bu durumda, $r_l = 1$ seçildiği için, $L_1 = L_2 = L_T / 2 = 0.1322$ mH olarak bulunur. (7) kullanılarak C_f , 37.303 uF olarak hesaplanır. Aynı zamanda, rezonans frekansı şebeke frekansının en az on katı olmalıdır. Bu durum aşağıda verilmektedir.



Şekil 3. Grafik tabanlı LCL filtre tasarımı (Graphic based LCL filter design)

$$f_{resLCL} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}}$$

Burada yapılan LCL tasarımı referans [11] temel alınarak yapılmıştır.

2.3. LLCL Filtre Tasarımı (LLCL filter design)

LLCL filtre tasarımında, LCL filtreye ek olarak L_f endüktansının tasarlanması gereklidir. Bu noktada LCL filtredaki tasarım aynen yukarıdaki gibi tamamlanır. Eşitlik Rezonans endüktansı L_f ise [13];

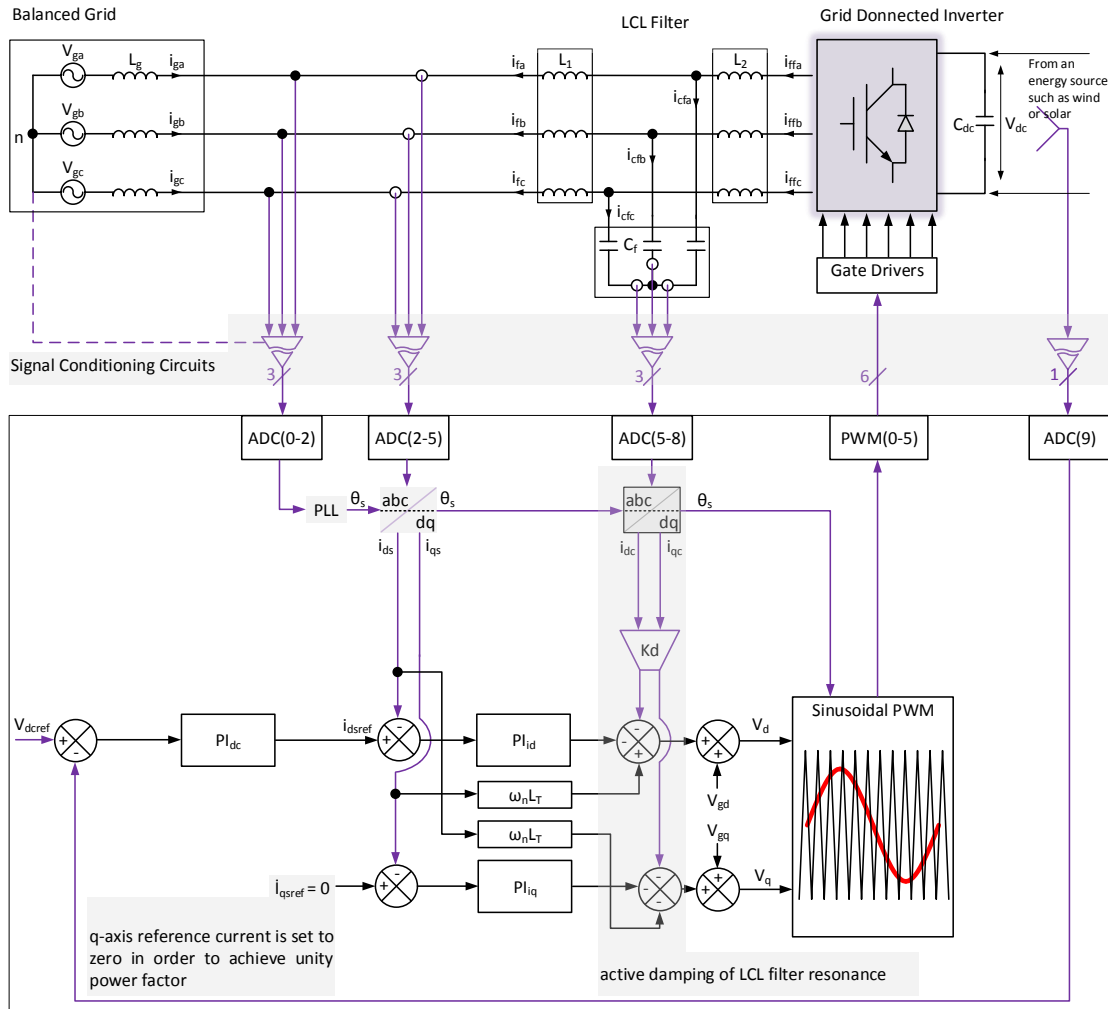
$$L_f = \frac{1}{C_f \omega_{sw}^2}$$

6.7904 uH olarak bulunur. Bu durumda, LLCL filtrenin rezonans frekansının, LCL filtreye olduğu gibi anahtarlama frekansının yarısından az olması gereklidir. LLCL filtrenin rezonans frekansı ise [13];

3052.2 Hz olarak hesaplanmaktadır. Bu durumda ilgili koşul sağlanmaktadır. Aktif sönümleme şemasini LLCL filtreye, aynı LCL filtreye olduğu gibidir, ek bir ölçüm veya geri besleme gerekmemektedir. Ayrıca, LCL ve LLCL filtrelerde kullanılan aktif sönümleme filtrenin boyutunu artırmamaktadır. Fakat pasif sönümlemede direnç kondansatörlere seri direnç kullanıldığı için filtrenin boyutu artmaktadır.

3. DENETİM SİSTEMİ PARAMETRELERİNİN TASARIMI (DESIGN OF CONTROL SYSTEM PARAMETERS)

Simülasyon çalışmalarında kullanılan kapalı çevrim denetim sistemi, Şekil 4'te verilmektedir. LLCL filtre durumunda, C_f kondansatörüne seri olarak, Şekil 1'de görüldüğü gibi L_f endüktansları bağlanır. Kondansatör akımı geri besleme söndürme şeması LLCL filtre için, tıpkı LCL filtreye olduğu gibi uygulanmaktadır. L filtre durumunda söndürme şemasının kaldırılması ve Şekil



Şekil 4. LCL filtreli kapalı çevrim denetim sisteminin şeması (Closed loop control system with LCL filter)

$$f_{resLLCL} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{(L_1 L_2)}{(L_1 + L_2)} + L_f \right] C_f}}$$

4'te verilen LCL filtre yerine sadece L filtrenin konulması gereklidir. (10)

Bu çalışmada kullanılan PI denetleyicilerde, eşitlik (11)'de görüldüğü gibi tek kazançlı şema kullanılmıştır.

Bu PI denetleyiciye ait transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G_{PI}(s) = k \frac{sT_i + 1}{sT_i} \quad (11)$$

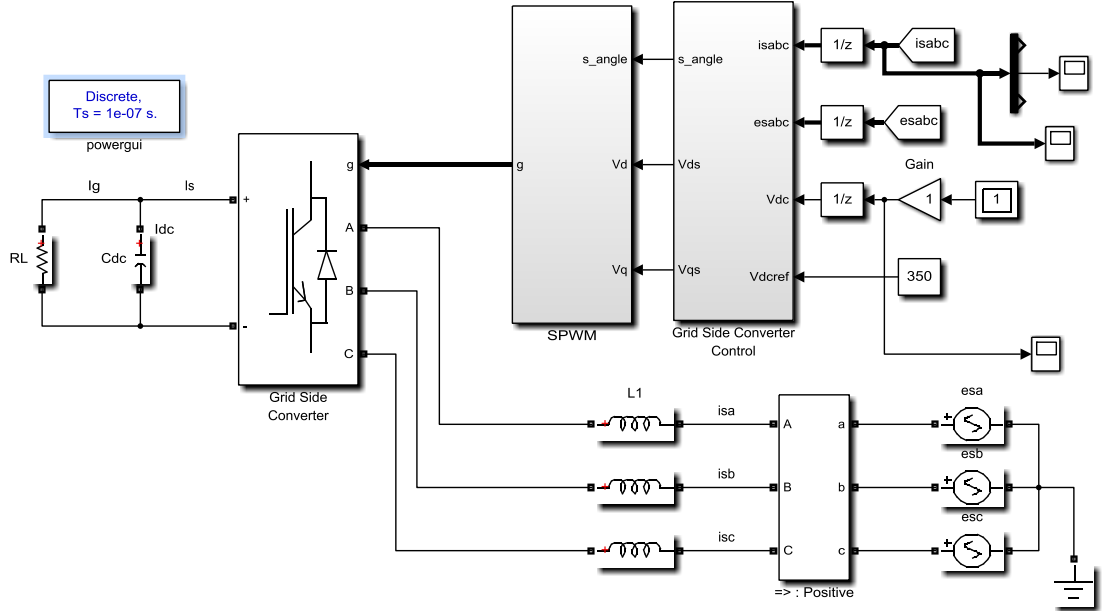
DC bara gerilim PI denetleyicinin simetrik optimum [23-24] yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşıma göre, DC bara geriliminin sabit bir referansa yerleştirilmesi kabul edilerek, katsayılar aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_{dc} = \frac{2 \cdot V_{dc} \cdot C_{dc}}{3 \cdot a_{dc} \cdot T_{in} \cdot V_{gd}} \quad T_{dc} = a_{dc}^2 \cdot T_{in} \quad a_{dc} = 3$$

d ve q eksenleri için akım denetleyicilerinin kazançları aynıdır. Bu kazançlar simetrik optimum [23-24] yaklaşımı ile;

$$k = L_T / (2T_{sw}) \quad T = a^2 T_{sw} \quad a = 3$$

olarak verilmektedir. L filtre durumunda, L_T yerine L değeri yazılmalıdır. LLCL filtre için ise katsayılar LCL ile aynıdır. LCL ve LLCL filtrelerde işletilen kondansatör geri besleme söndürme şemasında, K_d kazancının en düşük ve en yüksek değerleri ise aşağıdaki gibi verilmektedir [26].



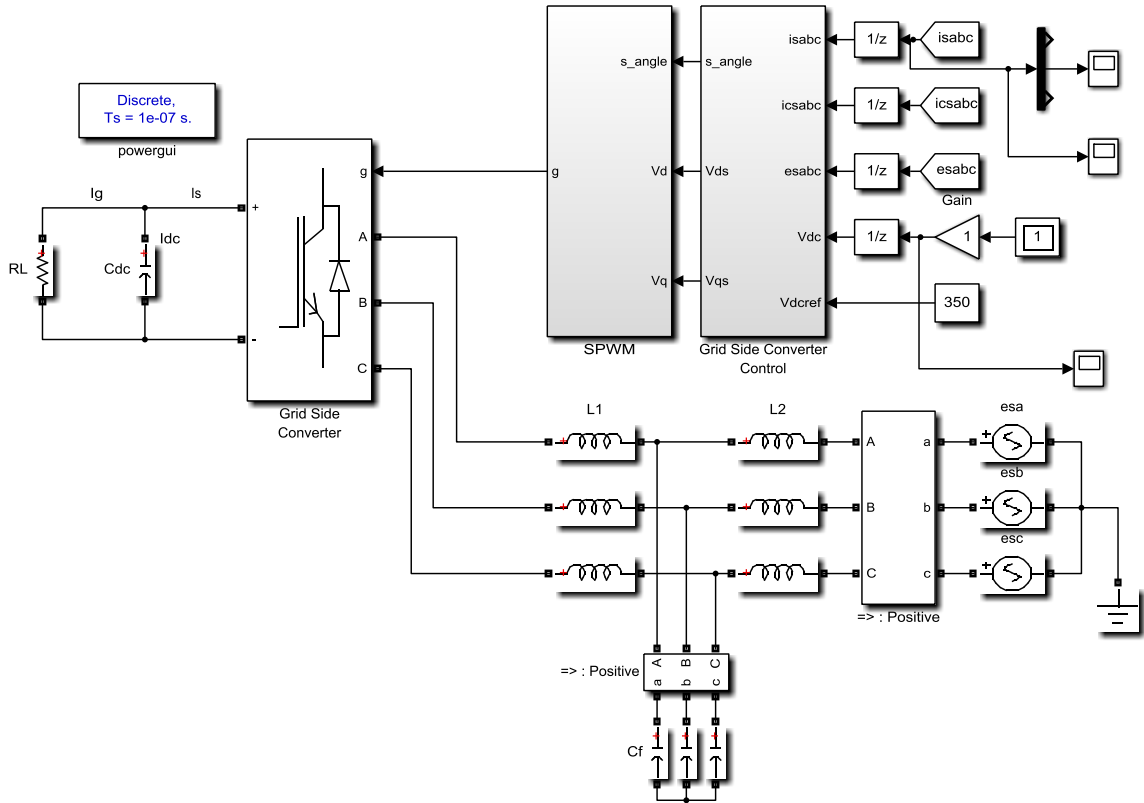
Şekil 5. L filtre simülasyon şeması (L filter simulation scheme)

$$K_{dmin} = \frac{1}{3} L_1 f_{sw} \quad (12)$$

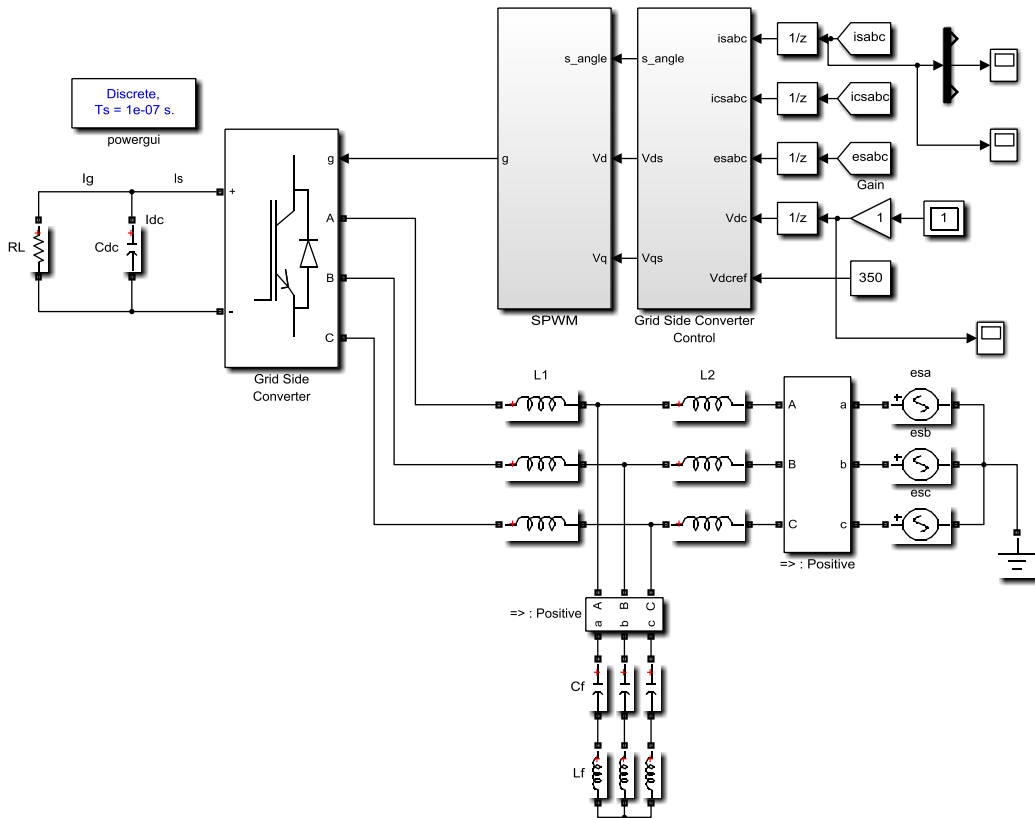
$$K_{dmax} = \frac{2}{3} \frac{\pi}{\sqrt{3}} L_2 f_{sw}$$

4. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS) (13)

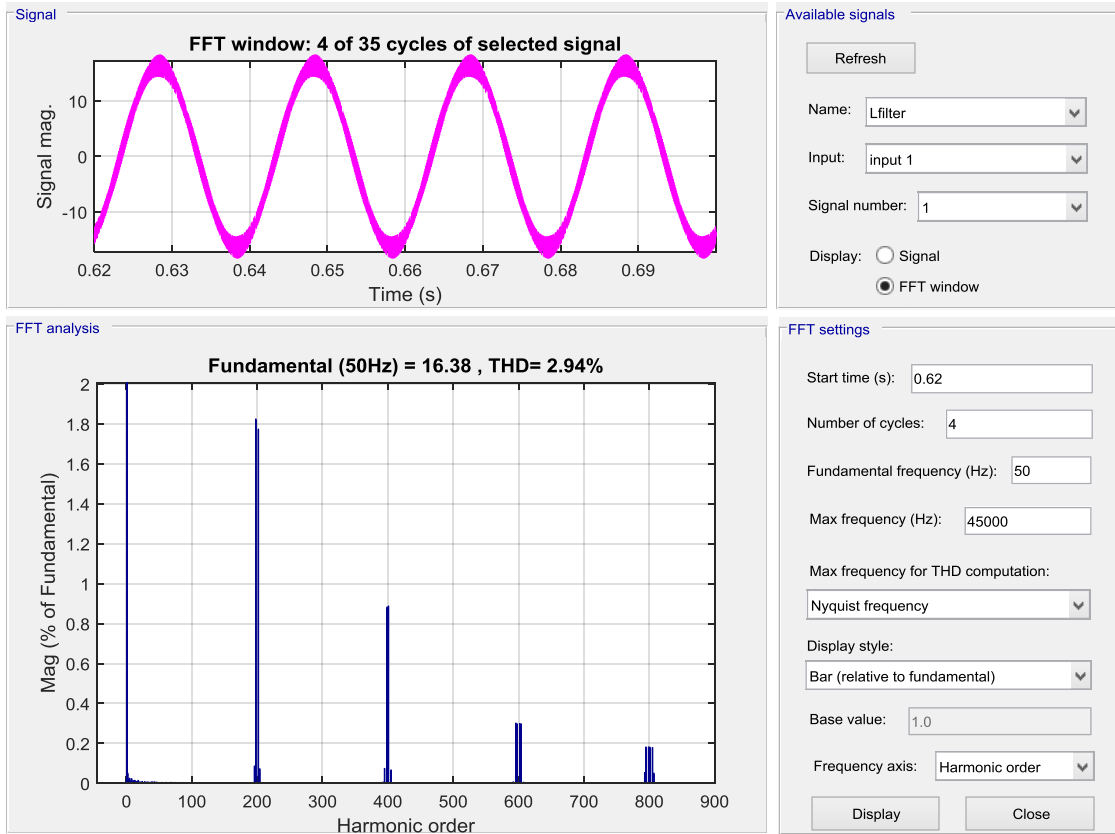
Verilen güç ile frekans değerleri ve her üç filtre tasarımı için simülasyon çalışmaları yapılmış ve faz akımlarının THD'leri ile harmonik dağılımları elde edilmiştir. Şekil 5'de L filtre simülasyon şeması, Şekil 6'da LCL filtre şeması ve Şekil 7'de ise LLCL filtre şeması verilmiştir. Şekil 8'de L filtre, Şekil 9'da LCL filtre ve son olarak Şekil 10'da LLCL filtre sonuçları verilmiştir.



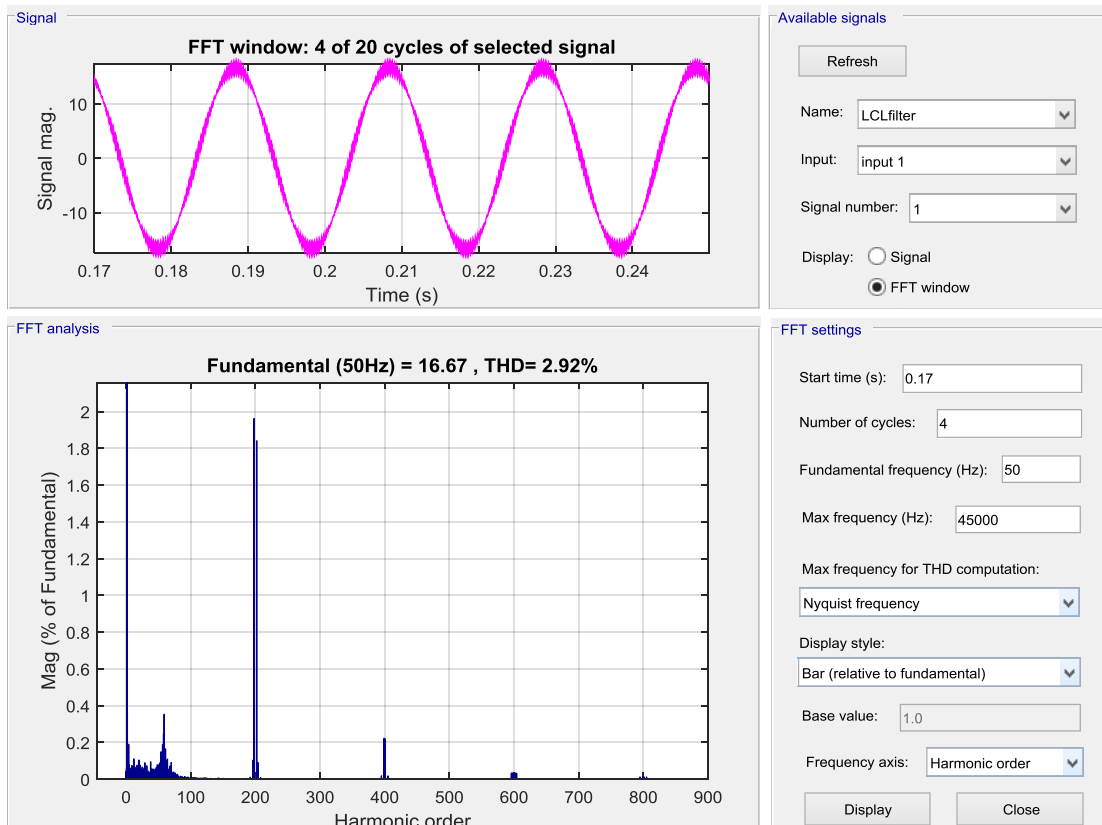
Şekil 6. LCL filtre simülasyon şeması (LCL filter simulation scheme)



Şekil 7. LLCL filtre simülasyon şeması (LLCL filter simulation scheme)

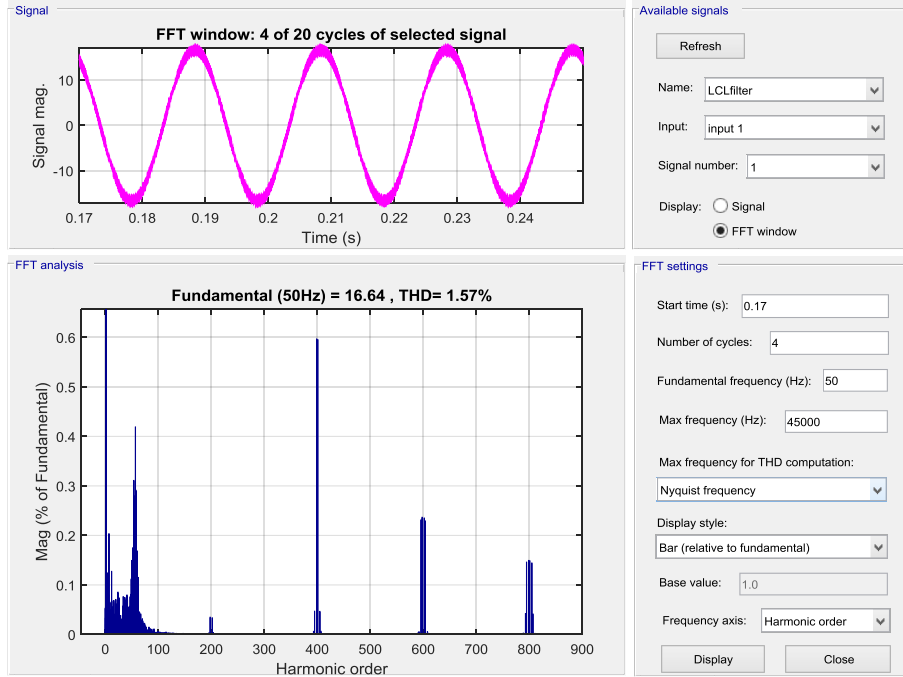


Şekil 8. L filtre için harmonik dağılımı ve THD (THD and harmonic distribution for L filter)



Şekil 9. LCL filtre için harmonik dağılımı ve THD(THD and harmonic distribution for LCL filter)

duymaktadır. L ve LCL filtre için tasarlanacak olan Bu



Şekil 10. LLCL filtre için harmonik dağılımı ve THD (THD and harmonic distribution for LLCL filter)

Simülasyon çalışmaları şebekeye güç aktararak değil şebekeden güç çekerek yapılmıştır. Bu durumun filtrelerin çalışması üzerinde bir etkisi yoktur, filtreler her iki durumda da aynı şekilde çalışmaktadır, sadece güç akışının yönü bu iki durum için farklıdır. L filtre ile %2.93 THD, LCL filtre ile %2.92 THD ve son olarak LLCL filtre ile %1.57 THD elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

L filtre için amaçlanan THD %3.0, gerçekleşen THD %2.93, LCL filtre için amaçlanan THD %3.0, gerçekleşen THD %2.92, LLCL filtre için ise amaçlanan THD %3.0, gerçekleşen THD %1.57 olmuştur. LCL filtrenin endüktans boyutu, L filtreden yaklaşık olarak 9.45 kat daha düşüktür. Buna rağmen LCL filtrenin harmonik performansı L filtre ile hemen hemen aynıdır. Bu durum LCL filtrenin L rakibine göre daha üstün olduğunu göstermektedir. LLCL filtre ile LCL filtre çok yaklaşık olarak aynı boyutlarda olmasına rağmen LLCL filtrenin THD'su LCL filtrenin neredeyse yarısına eşittir. Bu bakış açısı altından en yüksek performansın LLCL filtre ile elde edildiği rahatça ifade edilebilir.

Sonuçlarda dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da, giriş bölümünde de bahsedildiği gibi, LLCL filtrenin m_f civarındaki harmonikleri LCL filtreye göre daha çok bastırması fakat m_f 'nin katlarını civarındaki harmonikleri ise LCL filtreye göre daha az bastırmasıdır. Bu durumda L filtre, $m_f = 200$ ve $m_f = 400$ için, LCL filtre sadece $m_f = 200$ için, ve son olarak LLCL filtre $m_f \cong 65$ ve $m_f = 400$ için EMI (Elektromanyetik Karışım/Girişim) filtresine ihtiyaç

açından ise LCL filtre en üstün filtre olarak ortaya çıkmaktadır. Fakat, L_f endüktansında meydana gelebilecek %20 değişimin, harmonik bastırma oranını yaklaşık olarak %20 azaltacağı unutulmamalıdır. Bu durum ise LLCL filtrenin L_f ve C_f ikilisinin oluşturduğu rezonans frekansına veya diğer bir deyişle L_f ve C_f parametrelerine çok duyarlı olduğunu göstermektedir [13]. LCL filtre şebeke endüktansına bu kadar duyarlı değildir. İleri seviye bilgiler için ilgili kaynak incelenebilir [13].

Bu çalışmada LLCL filtre tasarımı yapılmış ve sonuçlar L ve LCL filtreler ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak en yüksek performans THD ve boyut açısından LLCL filtre ile elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları, yapılan filtre tasarımlarında performans hedeflerine bütün filtreler ile ulaşıldığını doğrulamaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TUBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 114E159).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Liserre M., Blaabjerg F. and Hansen S., "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier", *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 41(5):1281-1291, (2005).
- [2] Reznik A., Simoes, M. G., Al-Durra, A. and Muyeen S. M., "LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems", *IEEE Transaction on Industry Applications*, 50(2): 1225-1232, (2014).

- [3] Wang T. C., Ye Z., Sinha G. and Yuan X., "Output filter design for a grid-interconnected three-phase inverter", *In Proceeding of IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference (PESC 03)*, Acapulco, 779-784, (2003).
- [4] Terzić B., Majić G. and Slutej A., "Stability analysis of three-phase PWM converter with LCL filter by means of nonlinear model", *Automatika*, 51(3): 221-232, (2010).
- [5] Renzhong X., Lie X., Junjun Z. and Jie D., "Design and research on the LCL filter in three-phase PV grid-connected inverters", *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, 5(3): 322-325, (2013).
- [6] Muhlethaler J., Schweizer M., Blattmann R., Kolar J. W. and Eklebe A., "Optimal design of LCL harmonic filters for three-phase PFC rectifiers", *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 28(7): 3114-3125, (2013).
- [7] Rockhill A. A., Liserre M., Teodorescu R. and Rodriguez, P., "Grid-filter design for a multimewatt medium-voltage voltage-source inverter", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4): 1205-1217, (2011).
- [8] Koutroulis E. and Blaabjerg F., "Methodology for the optimal design of transformerless grid-connected PV inverters", *IET Power Electronics*, 5(8): 1491-1499, (2012).
- [9] Araújo S. V., Engler A., Sahan B. and Antunes F. L. M., "LCL filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines", *ICPE (ISPE)*, Daegu, 1133-1138, (2007).
- [10] Wei L., Lukaszewski R. A., "Optimization of the main inductor in a LCL filter for three phase active rectifier", *In Industry Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2007 IEEE*, New Orleans, 1816-1822, (2007).
- [11] [Pena-Alzola R.](#), [Liserre M.](#), [Blaabjerg F.](#), [Ordóñez M.](#) and [Yongheng Y.](#), "LCL-Filter Design for Robust Active Damping in Grid-Connected Converters", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 10(4): 2192-2203, (2014).
- [12] Husev O., Chub A., Romero-Cadaval E., Roncero-Clemente C. and Vinnikov D., "Voltage Distortion Approach for Output Filter Design for Off-Grid and Grid-Connected PWM Inverters", *Journal of Power Electronics*, 15(1): 278-287, (2015).
- [13] Wu W., He Y. and Blaabjerg F., "An LLCL power filter for single-phase grid-tied inverter", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 27(2): 782-789, (2012).
- [14] Loh P. C., Lim S. W., Gao F. and Blaabjerg F., "Three-level Z-source inverters using a single LC impedance network", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 22(2): 706-711, (2007).
- [15] Habetler T. G., Naik R. and Nondahl T. A., "Design and implementation of an inverter output LC filter used for dv/dt reduction", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17(3): 327-331, (2002).
- [16] Golubev V., "Calculation and optimization of the LC-filter of the pulse converter of an AC voltage", *Tekhnichna Elektrodinamika*, 1:33-37, (2012).
- [17] Gonzalez-Castrillo P., Romero-Cadaval E., Milanés-Montero M. I., Barrero-González F. and Guerrero-Martínez M. A., "A new criterion for selecting the inductors of an Active Power Line Conditioner", *2011 7th International Conference-Workshop, In Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Tallinn, 167-172, (2011).
- [18] Channegowda P. and John V., "Filter optimization for grid interactive voltage source inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(12): 4106-4114, (2010).
- [19] Cadaval E. R., Montero M. I. M. and González F. B., "A modified switching signal generation technique to minimize the RMS tracking error in active filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 20(5): 1118-1124, (2005).
- [20] Kim, H. and Sul S. K., "A novel filter design for output LC filters of PWM inverters", *Journal of Power Electronics*, 11(1), 74-81, (2011).
- [21] Sozer Y., Torrey D. A. and Reva S., "New inverter output filter topology for PWM motor drives", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15(6): 1007-1017, (2000).
- [22] Huang M., Blaabjerg F., Loh P. C. and Wu W., "Stability analysis and active damping for LLCL-filter based grid-connected inverters", *2014 International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA)*, Hiroshima, 2610-2617, (2014, May).
- [23] Dannehl J., Wessels C. and Fuchs F. W. "Limitations of voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with filters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(2): 380-388, (2009).
- [24] Schröder D., "Elektrische Antriebe", 2, *Springer-Verlag in Regelung von Antriebssystemen*, Berlin, Germany, (2001).
- [25] C. Zhang, T. Dragicevic, J.C. Vasquez, J.M. Guerrero, "Resonance damping techniques for grid-connected voltage source converters with LCL filters — A review", *IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, Dubrovnik, 169 -176, (2014).
- [26] Pena-Alzola R., Liserre M., Blaabjerg F. and Yang Y., "Robust design of LCL-filters for active damping in grid converters", *Industrial Electronics Society, IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE*, Vienna, 1248-1253, (2013).

Rüzgar ve Termik Santrallerden Oluşan Enerji Sistemlerinde Ekonomik Güç Dağılımının Big-Bang Big-Crunch, PSO ve IMO Algoritmaları ile İrdelenmesi

Alp KARADENİZ*, Mehmet Kubilay EKER

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, BALIKESİR

(Geliş / Received : 18.08.2015 ; Kabul / Accepted : 18.11.2015)

ÖZ

Bu çalışmada, rüzgar santrallerinin enerji sisteminde artan etkilerini irdeleyebilmek için, rüzgar ve termik santrallerinden oluşan hibrit sistemin ekonomik güç dağılım problemi, üç güncel sezgisel algoritma kullanarak incelenmektedir. Optimizasyon çalışmalarında kullanımı yaygın olan Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) ve Big-Bang Big-Crunch (BB-BC) algoritmalarının yanında, literatüre yeni olarak sunulan İyon Hareket Optimizasyonu (Ions Motion Optimization, IMO) algoritması da kullanılarak en iyi ekonomik güç dağılımının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Algoritmalarda kullanılan amaç fonksiyonunun minimize edilmesinin yanında, bu algoritmaların bilgisayarda harcadığı süreler de belirlenerek, enerji tesisi işletmecisinin süre yönünden de etkileneceği durumun ortaya konulması hedeflenmektedir. Çalışma sonuçları dikkate alındığında, BB-BC ve PSO algoritmalarının, IMO algoritmasına göre daha hızlı ve etkili olduğu anlaşılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Big-Bang Big-Crunch Optimizasyonu, Parçacık Sürü Optimizasyonu, İyon Hareket Optimizasyonu, Ekonomik Güç Dağılımı, Rüzgar-Termik Hibrit Sistemler

BB-BC, PSO and IMO Algorithms for Economic Dispatch Problem of Wind-Thermal Power Plants

ABSTRACT

In this study, for examining the effect of wind power systems on energy systems, three new heuristic methods were compared to solve economic dispatch problem of wind-thermal (hybrid) plants. These three heuristic algorithms are Big-Bang Big-Crunch (BB-BC), Particle Swarm Optimization (PSO) that is generally used in optimization area and Ions Motion Optimization (IMO) which is newly developed. The objective function (the cost function) was solved to have minimum value in minimum time interval which can be affective on electricity system operator. The results were evaluated with different aspects (i.e. run-time, best value) available in the literature. The results of the comparison demonstrated that BB-BC algorithm and PSO algorithm were more effective than IMO algorithm.

Keywords: Big-Bang Big-Crunch Optimization, Particle Swarm Optimization, Ions Motion Optimization, Economic Dispatch Problem, Wind-Thermal Hybrid Plants

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik güç sistemlerinde, tüketicilerin ihtiyaç duyduğu güç için gerekli güç üretim maliyetinin minimize edilmesi, ekonomik dağılım (ED) problemi olarak adlandırılmaktadır [1]. Buradaki amaç hangi generatörün, en az üretim maliyetiyle, ne kadar güç üretmesi gerektiğini hesaplamaktır. Klasik santraller (özellikle termik) dikkate alınarak, ekonomik güç dağılımının belirlenmesi için birçok çalışma yapılmıştır [1-3]. Fakat rüzgar enerjisine olan ilginin son yıllarda artması ve rüzgar santrallerinin, termik santrallerin yanında yer alması sonucunda, bu hibrit şebeke yapısı için gerekli ekonomik güç dağılımının hesaplanması başlı başına bir gereklilik haline gelmiştir.

Günümüzde artan yakıt fiyatları, azalan fosil yakıtlar ve çevreye verilen zararları göz önünde bulundurarak birçok ülke yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmiştir. Bu kaynakların arasında en çok gelecek vadedenlerden biriside rüzgar enerjisidir [4]. Ekonomik güç dağılımı problemlerindeki klasik hesaplamalarda, sistemi besleyen her bir santralin güç-maliyet eğrisi ve generatörlerin mini-mum ve maksimum kapasitesi gibi kısıtlar dikkate alınarak, tüketiciler tarafından kullanılması beklenen toplam yük değeri için minimum maliyet oluşturacak biçimde hangi santralin ne kadar gücü sisteme aktarması gerektiği planlanmaktadır. Rüzgar santralinin sisteme aktaracağı güç ise kontrol edilebilir bir büyüklük değildir. Bu yüzden tüketicinin değişen güç talepleri için, planlanan zaman dilimi içinde rüzgar santralinin sisteme ne kadar güç aktarabileceğinin tahmin edilmesi gerekmektedir.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: akaradeniz@balikesir.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 261-268

Rüzgar santrali tarafından üretilecek güçle, rüzgar hızı arasında doğrudan bir ilişki olduğu dikkate alındığında, rüzgar hızının belirlenen bir bölge için matematiksel olarak modellenmesi ve bu modelde kullanılan katsayı-lara bağlı olarak rüzgar santralının üreteceği güç değişiminin tanımlanması, belirlenen bir zaman diliminde rüzgar santralının sisteme aktaracağı gücün bilinmesi için önemlidir [5]. Rüzgar hızının tahmini [6] veya rüzgar hızına bağlı gücün, Weibull dağılımı [7] ve benzeri [8] istatistiksel yöntemler kullanılarak belirlenmesine yönelik çalışmalar literatürde mevcut olsa da, bu çalışmanın amacını rüzgar santrallerinden oluşan hibrit sistemlerde ekonomik güç dağılımının belirlenmesi oluşturmaktadır.

Hidroelektrik santrallerde olduğu gibi rüzgar santrallerinde de yakıt maliyeti bulunmasa da, elektrik enerjisi işletim operatörü (Türkiye için TEİAŞ), elektrik enerjisi üreticilerinden, gün öncesinde ve gün içinde ne kadarlık gücü ne kadar bedelle satacaklarına ilişkin taleplerini almaktadır [9]. Rüzgar Santrali işletmecilerinin de, elektrik şebekesine ne kadarlık güç aktaracak-larını ve satış maliyetini operatöre iletmeleri gerekmektedir. Ayrıca hidroelektrik santrallerden farklı olarak, planlanan zaman diliminde tahmin edilen rüzgar gücünün üstünde bir gücün sisteme aktarılması durumunda sistemde bulunan klasik santrallerin üretimlerini düşürmeleri gerekeceğinden ve bu durum ekonomik maliyet hesaplamasına fazladan bir yük getireceği için bir ceza katsayısının dikkate alınması gerekmektedir. Benzer biçimde rüzgar santralinden alınması beklenen gücün düşük değerde olması durumunda da, sistemdeki klasik santrallerin, fazladan sisteme güç aktarması gerekecektir ki, bu da ekonomik dağılım problemi hesaplamalarına (rezerv maliyeti) dahil edilmesi gereken diğer bir unsurdur [10].

Günümüzde birçok sezgisel, üst sezgisel ve bunların haricinde doğadan ilham alınarak bulunan algoritmalar ışığında ekonomik dağılım problemi için çözümler üretilmektedir [11]. Klasik algoritmaların çoğu rastgele olmayan bir düzene (lineer programlamadaki simpleks metodu gibi) bağlı kalmaktadırlar. Bazı klasik algoritma-lar ise yerçekimi metoduna bağlı kalmaktadır ve bunlara yerçekimi tabanlı rastgele olmayan algoritmalar (Newton-Raphson metodu gibi) denilmektedir. Fakat amaç fonksiyonunda devamlı olmayan bir hal var ise, bu yöntemler doğru sonuçlar vermeyebilirler. Bu gibi durumlarda ise yerçekimi tabanlı olmayan algoritmalar önerilir. Diğer bir algoritma tipi ise doğadan esinlenerek oluşturulan üst sezgisel metotlardır. Bu tarz metotlarda deneme yanılma yolu ile çözüm uzayında birçok çözüm üretilir ve istenilen amaç fonksiyonunun çözümü elde edilir. Bu çözüm istenilen çözüme ne kadar yakın ise o kadar doğru ve yeterli denebilecek ölçüde bir sonuç elde edilmiş olur. Çözüme yakınlık açısından gerekli sınırlamalar veya şartlar her amaç fonksiyonu için özeldir [11]. Bu çalışmada kullanılan PSO, BB-BC ve IMO gibi algoritmalar da doğadan esinlenerek bulunan üst sezgisel metotlardır.

Rüzgar enerjisi içeren ED modeli tahmini değişkenler, eşitsizlik ve eşitlik içeren sınırlamalar, birden fazla boyut ve parçalı lineer olmayan bir karakteristiğe sahiptir [12]. Bu problem türünü genetik algoritma (GA), benzetimle tavlama veya gradient metot ile çözmek zordur. Benzetimle tavlama veya GA'yı sisteme uyguladığımızda çözümler yavaş ve stabil olmayan şekilde elde edilir. Diferansiyel evrim (DE) metodu bu tür problemlerde çok iyi sonuçlar vermektedir, fakat mutant operatöründeki çözüm eksikliği yüzünden ayrı olasılık dağılımı elde edilemeyebilir, bu da tamamen kendiliğinden organize olan yapıyı ortadan kaldıracaktır [12]. Bu yüzden bu çalışmada, daha iyi sonuçlar gözlemlenen PSO, BB-BC ve IMO algoritmaları kullanılarak lineer olmayan optimizasyon problemine uygulanmış, elde edilen veriler ve grafikler ışığında, algoritmalar arasında çözüme ulaşma süreleri ve buldukları maliyet değerlerine göre karşılaştırmalar yapılmıştır.

Çalışmada incelenen 2 adet rüzgar ve 2 adet termik santral içeren 6 baralı örnek sistem üzerinde elektrik enerjisi maliyetlerini eniyilemek için kullanılan PSO ve BB-BC algoritmaları en iyi ve birbirine yakın değerler üretirken IMO algoritmasının diğer iki algoritmaya göre daha yüksek maliyet değerleri ürettiği görülmüştür.

2. EKONOMİK DAĞILIM MODELİ (ECONOMIC DISPATCH MODEL)

Enerji sistemlerinde, elektrik üreticisi santrallerin her birinin enerji üretim maliyetleri birbirinden farklıdır. Bir ağ yapısında olan güç sisteminde, ihtiyaç duyulan aktif ve reaktif güç değerlerini, sistemin kısıtları ve hatlar üzerindeki güç kayıplarını da dikkate alarak, üretim maliyetini minimize edecek biçimde hangi generatörlerin sisteme ne kadar güç aktarması gerektiğinin bulunması işleme optimum güç akışı (Optimum Power Flow, OPF) denilmektedir. Bu problemde, amaç fonksiyonu ve kısıtların bir arada toplanıp tek bir ifade altında birleştirilip minimize edilmesi gerekir ve bu işlem için sistemin güç akışı denklemlerinin de kullanılması gerekecektir. Belirli zaman aralığında ihtiyaç duyulacak sadece aktif güç değerlerini dikkate alarak, generatörlerin maksimum-minimum çalışma kısıtları arasında, üretim maliyet fonksiyonunun minimize edilmesi ise Ekonomik Dağılım (Economic Dispatch, ED) problemi olarak adlandırılır. Bu optimizasyon işlemine, OPF hesaplamalarında kullanılan denklemlere göre daha basit hesaplamalarla hatların aktif güç kayıplarının eklenmesi de mümkündür [13].

2.1. Ekonomik Dağılım Probleminin Amaç Fonksiyonu (The Objective Function of Economic Dispatch Problem)

2.1.1. Termik santrallerde enerji üretim maliyeti (The production cost of conventional energy)

Genel olarak fosil yakıtlarla çalışan generatörlerin girdileri Btu/h (British thermal unit/hour), çıktıları ise MW cinsindedir. Termik santraller için yakıt giderleri,

personel ve işletme giderleri dikkate alınarak elektrik enerjisi maliyet değişimi için Eşitlik-1'de verilen denklem kullanılmaktadır [13].

$$C_{t,i} = a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (1)$$

Burada; a_i, b_i ve c_i i'inci generatörün maliyet fonksiyonu sabitleridir. P_i i'inci generatörün planlanmış güç değerini, $C_{t,i}$ ise i'inci generatörün MW/h cinsinden toplam enerji üretim maliyetini ifade eder. Toplam olarak her bir termik santrallerdeki enerji üretimi için harcanan maliyet tutarı Eşitlik-2'de verilmektedir.

$$\sum_{i=1}^m C_i = \sum_{i=1}^m a_i P_i^2 + b_i P_i + c_i \quad (2)$$

Burada, m fosil yakıtla çalışan toplam generatör sayısını göstermektedir. Havaya salınan gazların da bir yayılım maliyeti vardır, ancak buradaki formülde bu durum ihmal edilmiştir. Rüzgar enerjisi üretiminde, fosil yakıt kullanılmadığı için gaz salınımı yoktur ve ilgili maliyet sıfıra eşittir [14].

2.1.2. Rüzgar enerji üretim maliyeti

(The production cost of wind energy)

Rüzgar hızı ve dolayısı ile gücünün belirsizliğinden dolayı, planlanan zamanda rüzgardan alınabilecek güçle ilişkili maliyet üç farklı formülle ifade edilir [10]. Eşitlik-3'de verilen, direk veya beklenen maliyet olarak adlandırılan $C_{w,i}$, şebekeye o an için rüzgar santralının aktaracağı güce bağlı olarak güç sistemi operatörünün ödeyeceği alım bedelidir.

$$C_{w,i} = d_i w_i \quad (3)$$

Burada; w_i , i'inci generatörde üretilen rüzgar gücünü göstermektedir. Klasik santraller için yapılan minimum maliyet analizi sonrasında, planlanan zamanda hesaplanan güç değerini her bir santralin sisteme aktarması beklenir. Planlanan zaman dilimi için rüzgar santralının sisteme aktarabileceği güç, her ne kadar meteorolojik hesaplamalarla daha önceden belirlenmeye çalışılsa da, bu hesaplamaların tamamen gerçekçi bir sonucu yansıtması beklenemez. Bu yüzden, beklenenden farklı bir güç değerinde rüzgar santralının sisteme güç aktarması durumunda, klasik santrallerin ya üretimlerini düşürmeleri ya da artırmaları gerekecektir. Bu durumda hesaplanan direk maliyet hesabının dışında yeni bir maliyet değeri sistem operatörüne yansiyacaktır ki bu durumun maliyet denklemlerinde dikkate alınması gereklidir. Eğer rüzgar gücü gerçekleşen durumdan düşük tahmin edilmişse, sisteme gelen bu fazla güç nedeniyle klasik santrallerin üretimlerini düşürmeleri gerekecektir. Bu durumdan kaynaklanan fazladan maliyet, Eşitlik-4 ile maliyet denklemine eklenir. Bu denklemdeki; $k_{p,i}$ ceza katsayısını, $f_w(w)$ rüzgar gücünün olasılık yoğunluk fonksiyonunu, $w_{r,i}$ ise i'inci rüzgar generatörün nominal güç değerini ifade eder [10].

$$C_{p,i} = k_{p,i} \int_{w_i}^{w_{r,i}} (w - w_i) f_w(w) dw \quad (4)$$

Eğer rüzgar gücü gerçekleşen durumdan fazla tahmin edilmişse, yüklerin ihtiyaç duyduğu toplam gücü sağlamak için klasik santrallerin sisteme fazladan güç

aktarmaları gerekecektir. Bu işlem de doğal olarak fazladan bir maliyet gerektirir ki, Eşitlik-5 ile maliyet hesaplamalarına dahil edilir. Bu denklemdeki $k_{r,i}$ katsayısı, klasik santrallerin sisteme fazladan güç aktarmaları durumunda oluşacak maliyetle ilişkili bir katsayıdır [10].

$$C_{r,i} = k_{r,i} \int_0^{w_i} (w_i - w) f_w(w) dw \quad (5)$$

2.2. Sınırlamalar (Constraints)

Amaç fonksiyonunun çözümü sırasında birtakım sınırlamalara uyulması çözümün doğruluğu açısından çok önemlidir. Gerekli şartlar aşağıdaki denklemlerde verilmektedir [10].

$$p_i^{min} \leq p_i \leq p_i^{max}$$

$$0 \leq w_i \leq w_{r,i}$$

$$\sum_{i=1}^m p_i + \sum_{i=1}^n w_i = L \quad (6)$$

Yukarıdaki ifadede, p_i^{min}, p_i^{max} sırasıyla i'inci klasik generatörün minimum ve maksimum güç değerlerini, w_i i'inci rüzgar generatörün ürettiği güç değerini, $w_{r,i}$ i'inci rüzgar generatörün nominal güç değerini, L ise toplam istenilen güç değerini ifade eder [12,15]. Yukarıda belirtilen bütün durumunlar dikkate alındığında, amaç fonksiyonu için Eşitlik-7'de verilen ifade elde edilir.

$$\min C = \sum_{i=1}^m C_i(p_i) + \sum_{i=1}^n C_{w,i}(w) + \sum_{i=1}^n C_{p,i}(w) + \sum_{i=1}^n C_{r,i}(w) \quad (7)$$

3. ALGORİTMALAR (ALGORITHMS)

3.1. Big-Bang Big-Crunch Optimizasyonu

(Big-Bang Big-Crunch Optimizaton, BB-BC)

Big-Bang Big-Crunch metodunda, rastgeleliği enerji dağılımına, global optimal çözümü ise yerçekimine benzetirsek çok da yanlış olmayız. Bu metotta genel olarak düzensizliği enerji dağılımı ile yakınsanmış düzenli parçacıkları dağıtıp, bir sonraki adım için çözüm uzayına, çözüm adayları olarak dağıtırız. Burada düzensizlik veya kaos oluşturmuş oluruz. İlk çözüm adayları üretilirken kullanılan metot genetik algoritma (GA) ile benzerdir. Big-Bang Big-Crunch iki fazdan oluşur. İlki Big-Bang, yani çözüm uzayına yeni çözüm adaylarını dağıttığımız faz, diğeri ise Big-Crunch fazıdır. Big-Crunch fazında ortak bir kütle merkezi bulunup en iyi çözümün o olduğu varsayılarak, bir sonraki adımda üretilecek çözümler bu kütle merkezi etrafına yakınsanarak oluşturulur. Kütle merkezini (Eşitlik-8) bulmak için minimize edeceğimiz fonksiyonlarda kütle olarak uyum fonksiyonunun tersi alınır [16].

$$\bar{x}^c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i} \bar{x}^i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i}} \quad (8)$$

Yukardaki formülde \bar{x}^c kütle merkezini, \bar{x}^i n-boyutlu uzayda bir çözüm noktasını, f^i uyum fonksiyonunun \bar{x}^i noktasındaki değerini, N Big-Bang fazında oluşturulan

popülasyon büyüklüğünü ifade eder.

Big-Crunch fazında ortak kütle merkezi bulunduktan sonra, yeni adımda çözümler bu kütle merkezi ve ayrıca en iyi çözüme sahip çözümün etrafında aşağıdaki denklemlere (Eşitlik-9 ve 10) göre oluşturulur [17].

$$x_i^{new} = X^c + \sigma \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{r\alpha(x_{max} - x_{min})}{k} \quad (10)$$

Yukarıdaki formülde α arama uzayını sınırlandırmak için kullanılan parametre, r standart rastgele oluşturulmuş sayı, x_{max} ve x_{min} en üst ve en alt optimizasyon problemi için belirlendiğimiz sınır değerleri, k adım sayısını ifade eder. İkinci patlamadan sonra kütle merkezi tekrar hesaplanır. Bu patlama ve toplanma işlemleri durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder.

Çözüm için performansı arttırmak amacı ile Eşitlik-11'de verilen denklem ile hem kütle merkezinden hem de global en iyi çözümden yararlanarak daha iyi yeni çözümler elde edebiliriz [18].

$$X^{(k+1,i)} = \beta X^{c(k)} + (1 - \beta)X^{gbest(k)} + \sigma \quad (11)$$

Burada, β değeri global en iyi çözümün kütle merkezine göre öncelik katsayısını ifade etmektedir. Hangisinin daha öncelikli ve etkili olduğu düşünülüyorsa onun β değeri artırılmalıdır. $X^{(k+1,i)}$ değeri yeni adımda üretilen çözüm adaylarını ifade eder. Bu çalışmada yapılan denemeler ışığında en iyi sonucu veren $\beta = 0.2$ ve $\alpha = 1$ değerleri kullanılmıştır. Durdurma kriteri sağlanana kadar yukarıdaki anlatılanlar bir döngüde devam eder.

3.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO)

PSO algoritması, 1995 yılında Dr. Eberhart ve Dr. Kennedy tarafından geliştirilmiş, sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Bu algoritma, sürü halindeki kuşların birbirleri ile olan çeşitli nedenlerden (yiyecek bulma, avcılardan korunma vb.) dolayı ilişkilerinde bilgi paylaşımına dayandığı için sosyolojik temelli bir algoritmadır. Bu algortmada, her bir kuş bir bireyi temsil eder ve bu bireylerin toplamı da sürüyü oluşturur. Burada amaç hangi kuşun en iyi konum bilgisine sahip olduğu ve bunu diğer kuşlara bildirip topluca en iyi çözüm etrafında değişkenlerin (kuş) toplanmasıdır. Her bir kuş kendi pozisyonunu sürüdeki en iyi pozisyona göre ayarlar ve bu sırada önceki bilgilerinden de yararlanır. Tabi en iyi konum, her bir parçacığın (kuş) uygunluk fonksiyonu değerlerine göre hesaplanır. Kuşların hız ve konum bilgileri her bir adımda tüm parçacıkların en iyi ($gbest$) ve o parçacığın en iyi çözümü ($pbest$) göz önünde bulundurulup hem rastgele hem de matematiksel olarak hazırlanan Eşitlik-12'de verilen algoritma ile hesaplanır ve bu değerler saklanır [19]. Algoritmanın genel işleyişi aşağıdaki gibidir:

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1U(pbest_{id}^k - x_{id}^k) + c_2U(gbest_{id}^k - x_{id}^k)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$d = 1, 2, \dots, m$$

$$v_i = [v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}]$$

$$pbest_i = [pbest_{i1}, pbest_{i2}, \dots, pbest_{im}] \quad (12)$$

Bu denklemlerde; n , bir gruptaki çözüm sayısını; m , çözümdeki eleman sayısını; k , adım (jenerasyon) sayısını; w , eylemsizlik kuvveti sabitini; c_1 , c_2 hızlandırma sabitini; U , [0,1] aralığında rastgele bir sayıyı; x_{id}^k , v_{id}^k , i 'inci çözümün k 'inci adımdaki pozisyon ve hız bilgisini göstermektedir.

c_1 ve c_2 yapılan çalışmalar sonucunda, en iyi $c_1 = 2$ ve $c_2 = 2$ iken çözüme yardımcı olduğu bilinmektedir. w ise [0.9,0.4] arasında, adım sayısına bağlı olarak Eşitlik-13'de verilen ifade ile giderek azalır [2].

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} * iter \quad (13)$$

Burada w_{max} , w_{min} sırasıyla eylemsizlik kuvveti sabiti w 'nin maksimum ve minimum değerlerini, $iter_{max}$, algortmada kullanılacak adım sayısının üst limitini ve $iter$ değişkeni de o anki adım sayısını ifade eder [2].

3.3. İyon Hareket Optimizasyonu (Ions Motion Optimization, IMO)

İyon hareket optimizasyonu, iyonların (anyon ve katyon) birbirleri ile olan iletişimi göz önünde bulundurularak yakın geçmişte bulunan bir optimizasyon tekniğidir. Eksi yüklü iyonlar anyon, artı yüklüler ise katyon olarak adlandırılır. Temel olarak algoritma, aynı yüklü iyonların birbirini itmesi ve ters yüklülerin birbirini çekmesi felsefesine bağlıdır [20]. Çözüm için adaylar, biri anyonları diğeri ise katyonları ifade eden iki gruba ayrılır. Her bir iyon bir çözümü ifade eder ve çekme/itme kuvvetleri bu iyonların arama uzayında hareket etmesini sağlar. İyonlar, uyum fonksiyonundaki değerlerine göre ele alınırlar. Doğal olarak en iyi anyon katyonları, en iyi katyon ise anyonları kendine doğru çeker. Hareket etme oranları ise çekme/itme kuvvetlerine bağlı olarak değişir. Genel olarak her algortmada olduğu üzere, bu algortmada da biri sıvı, diğeri kristal faz olmak üzere iki adım vardır. Kristal fazında yerel minimum/maksimum noktalarına takılan çözümler elenip rastgele olarak atamalar yapılabilir.

3.3.1. Sıvı faz (Liquid phase)

Bu fazda sıvı içerisinde iyonlar daha hızlı hareket ederler. Sıvı fazda iyonların aynı işaretli olanların birbirini itme kuvveti, farklı işaretle olanların birbirini çekme kuvvetine göre çok azdır [20]. Bu yüzden çekme kuvvetleri, aradaki mesafeye bağlı olarak Eşitlik-14 ve Eşitlik-15'de verildiği gibi matematiksel olarak ifade edilebilir [21].

$$AF_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/AD_{i,j}}} \quad (14)$$

$$CF_{i,j} = \frac{1}{1 + e^{-0.1/CD_{i,j}}} \quad (15)$$

$$AD_{i,j} = |A_{i,j} - C_{best_j}| \quad (16)$$

$$CD_{i,j} = |D_{i,j} - A_{best_j}| \quad (17)$$

Yukarıdaki ifade; i , indeks sayısını; j , boyut sayısını, e , euler sayısını; $AD_{i,j}$ j 'inci boyuttaki en iyi katyon ile i 'inci sıradaki anyon arasındaki mesafeyi; $CD_{i,j}$ j 'inci boyuttaki en iyi anyon ile i 'inci sıradaki katyon arasındaki mesafeyi; $AF_{i,j}$ anyonların çekim kuvveti, $CF_{i,j}$ ise katyonların çekim kuvvetini ifade eder [21]. Bu kuvvetler, denklemlerden görüleceği üzere mesafe ile ters orantılıdır. Kuvvetler hesaplandıktan sonra, bu kuvvet değerlerinden yararlanıp yeni pozisyon bilgisi Eşitlik-18 ve 19 ile atanır.

$$A_{i,j} = A_{i,j} + AF_{i,j} * (C_{bestj} - A_{i,j}) \quad (18)$$

$$C_{i,j} = C_{i,j} + CF_{i,j} * (A_{bestj} - C_{i,j}) \quad (19)$$

Sadece güç değerinin, her bir iyonun en iyi ters yüklü iyonla doğru olan moment değerinin hesabında etkisi vardır. Adım sayısı arttıkça en iyi iyonlar etrafında diğer iyonlar toplanmaya başlar ve sıvı fazdan kristal faza doğru bir geçiş başlar. Kristal faz ise çözümün bulunduğu fazdır.

3.3.2. Kristal faz (Crystal phase)

Bu fazda, iyonlar bir noktaya yakınsarlar ve arama uzayının şekli bilinmediğinden bu nokta yerel minimum/maksimum noktası olabilir. Bu yüzden kaçış için atlama yapmak gereklidir. Doğada birbirini çeken iyonların sonuçta oluşturduğu kristal faz, aynı gücü aynı yükte uygulayarak yok edilip sıvı faz elde edilebilir. Yerel minimum/maksimum noktasından kurtulmak için gerekli algoritmik ifade aşağıda verilmektedir [21].

if (CbestFit >= CworstFit/2 and AbestFit >= AworstFit/2)

if rand () > 0.5

$$A_i = A_i + \phi_1 * (C_{best} - 1)$$

else

$$A_i = A_i + \phi_1 * (C_{best})$$

endif

if rand () > 0.5

$$C_i = C_i + \phi_2 * (A_{best} - 1)$$

else

$$C_i = C_i + \phi_2 * (A_{best})$$

endif

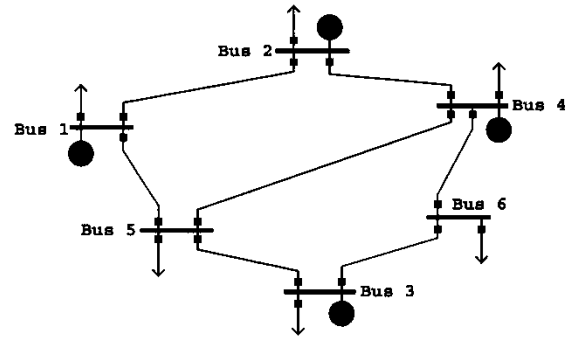
if rand () < 0.05

Re – initialized A_i and C_i **endif** **endif**

Bu ifade ϕ_1 ve ϕ_2 değerleri [-1,1] arasında değişen rastgele sayıları ve rand() ise [0,1] arasında değişen rasgele sayıyı ifade eder. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli noktalardan biri, ilk başta bir popülasyon oluştururken $r(ub_i - lb_i) + lb_i$ formülünden yararlanılması gerektiğidir. Burada r , rastgele tekdüze dağılımlı [0,1] arasında değişen sayıyı, lb ve ub ise sırasıyla alt ve üst limiti ifade eder [21].

4. PROBLEM VE OPTİMİZASYON UYGULAMALARI (PROBLEM AND OPTIMIZATION APPLICATIONS)

Çalışmada irdelenen ve Şekil-1'de şematik yapısı verilen 6-baralı sistem, 2 adedi termik (bara 1-2) ve 2 adedi rüzgar (bara 3-4) olmak üzere 4 adet generatörden oluşmaktadır [22]. Sistemde bulunan generatörlerin maliyet fonksiyonları için gerekli katsayı değerleri Çizelge-1'de verilmektedir [15]. Maliyet fonksiyonu katsayıları, generatörün güç üretimi maliyeti değişimleri dikkate alınarak deneysel yollar kullanılarak bulunur [5].

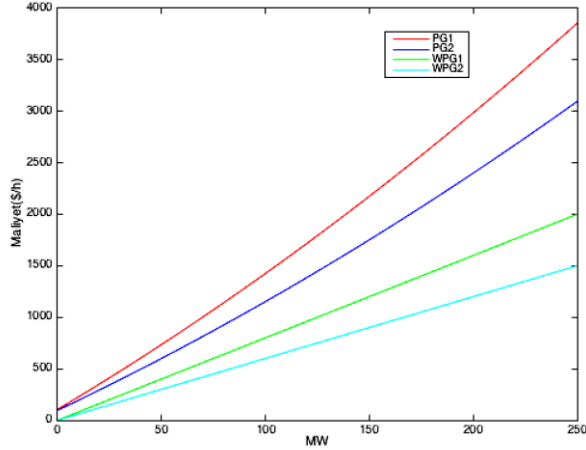


Şekil 1. 6-Baralı Örnek Sistem (Schematic diagram of 6-bus test system)

Çizelge 1. Maliyet Fonksiyonu Sabitleri (Cost Function Constants)

Gen. No.	a_i (\$/MW ² h)	b_i (\$/MWh)	c_i (\$/h)	Pg_min (MW)	Pg_maks (MW)
1	0.012	12	105	50	250
2	0.0096	9.6	96	50	250
3	0	8	0	0	40
4	0	6	0	0	40

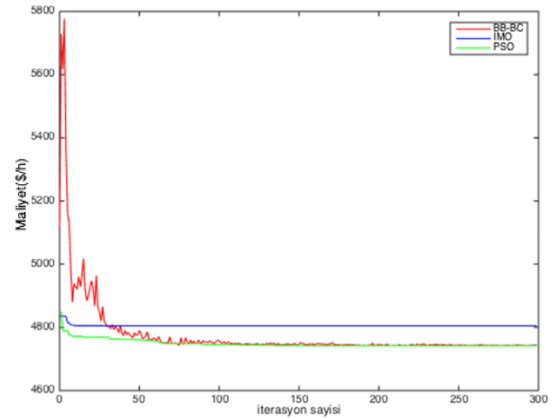
Çizelge-1'deki maliyet fonksiyonu katsayılarına göre maliyet değişimleri Şekil-2'de görülmektedir. Bu grafiğe göre, en yüksekte en düşüğe doğru generatörlerin maliyet sıralamasının PG1 (Gen-1), PG2 (Gen-2), WPG1 (Gen-3), WPG2 (Gen-4) olduğu açıktır. Buradaki kısaltmalarda, PG1 ve PG2 termik generatörleri, WPG1 ve WPG2 ise rüzgar generatörlerini göstermektedir.



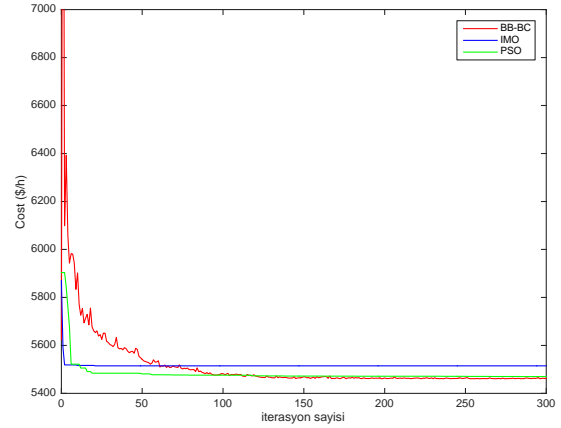
Şekil 2. Generatörlerin Maliyet Fonksiyonu Grafikleri (Cost Function Values of Generators)

Rüzgar gücü hesaplamalarda kullanılırken, tahmin edilenden fazla oluşan rüzgar gücü için ödenen ceza çarpanı $k_r = 0.0001$ ve rüzgar gücünün düşük değerde oluşmasına ilişkin maliyet katsayısı $k_p = 0$ alınmıştır. Bu demek oluyor ki, sistem operatörü rüzgar santrallerinin sahibi değildir ve termik santrallerin sisteme katacağı fazladan güç için bir maliyet ortaya çıkarmamaktadır. Rüzgar enerjisi ile çalışan sistemlerde istenilen en büyük güç değeri, rüzgar tribünlerinin üretebileceği en yüksek güç değerine eşittir ve çalışmada $w_r = 40$ MW alınmıştır [15].

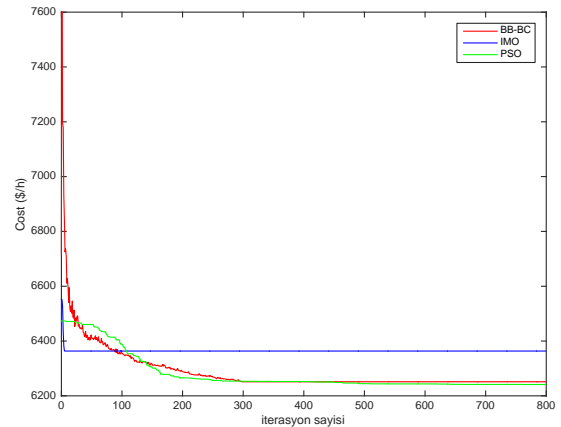
Algoritmaların çözümleri, 4GB DDR3 hafızaya sahip, i5 3.1 GHz işlemcili bilgisayarlar kullanılarak MATLAB ortamında yazılan programlarla yapılmıştır. Problem her üç algoritmaya 100'er kez olmak şartı ile uygulanıp, en iyi sonuçlar baz alınarak üç farklı toplam yük (400 MW, 450 MW, 500 MW) değeri için incelenmiştir. Ayrıca tüm algoritmalar için popülasyon sayısı 100 ve adım sayısı 1000 alınmıştır. 400 ve 450 MW için maliyet fonksiyonu verilerinde 300.üncü adımdan sonra değişim yaşanmadığından, grafiklerde 300.ncü adıma kadar olan veriler görülmektedir. 500 MW için ise değişim yaşanmadığı adım değeri 800'dür. Şekil-3'de 400 MW, Şekil-4'de 450 MW, Şekil-5'de ise 500 MW yük değerleri için, 3 farklı optimizasyon algoritması kullanılarak her bir adımda bulunan maliyet değerlerinin değişimi görülmektedir.



Şekil 3. 400 MW yük değerinde elde edilen maliyet Değerleri (Cost values of three methods at 400 MW load)



Şekil 4. 450 MW yük değerinde elde edilen maliyet Değerleri (Cost values of three methods at 450 MW load)



Şekil 5. 500 MW yük değerinde elde edilen maliyet Değerleri (Cost values of three methods at 500 MW load)

Çizelge-2 (400 MW yük için), Çizelge-3 (450 MW yük için) ve Çizelge-4'de (500 MW yük için) en iyi maliyet değeri için, her bir generatörün sisteme aktarması gereken aktif güç değerleri verilmektedir. Çizelgelerden

görülebileceği gibi BB-BC ve PSO algoritmaları generatör güçleri için birbirine göre nispeten yakın sonuçlar üretmesine rağmen, IMO algoritması diğer iki algoritmadan farklı değerler üretmektedir.

Çizelge 2. 400 MW Yük Değeri İçin En İyi Güç

Dağılımları (Best Results of Three Methods for 400 MW Load)

Gen (MW)	BB-BC	PSO	IMO
PG1	89.23	89.08	116.66
PG2	231.37	231.68	217.42
PG3	39.40	39.24	30.18
PG4	40.00	40.00	35.74
Toplam	400.00	400.00	400.00

Çizelge 3. 450 MW Yük Değeri İçin En İyi Güç

Dağılımları (Best Results of Three Methods for 450 MW Load)

Gen (MW)	BB-BC	PSO	IMO
PG1	124.44	125.88	143.80
PG2	246.3	244.80	234.85
PG3	39.26	39.33	37.31
PG4	40.00	39.99	34.04
Toplam	450.00	450.00	450.00

Çizelge 4. 500 MW Yük Değeri İçin En İyi Güç

Dağılımları (Best Results of Three Methods for 500 MW Load)

Gen (MW)	BB-BC	PSO	IMO
PG1	170.69	170.00	215.13
PG2	249.95	250.00	209.66
PG3	39.36	40.00	37.57
PG4	40.00	40.00	37.64
Toplam	500.00	500.00	500.00

Çizelge-5’de her bir algoritma için elde edilen maliyet değerleri görülmektedir. Bu verilerden görüleceği üzere, BB-BC algoritması ile PSO algoritması minimuma yaklaşma açısından benzer performans içerisinde olup, çok az farkla PSO algoritması BB-BC algoritmasını geride bırakmayı başarmıştır. Elde edilen veriler ışığında PSO ve BB-BC algoritmaları bu özel örneğin maliyet fonksiyonunu için sonucu, IMO algoritmasına göre daha başarılı bir şekilde çözmüştür.

Çizelge 5. 3 Farklı Yük İçin Optimum Maliyet Değerleri (Optimal Cost Values for 3 Different Loads)

Yöntem	BB-BC	PSO*	IMO
İterasyon sayısı	1000	1000	1000
Popülasyon sayısı	100	100	100
400 MW için (\$/h)	4742.30	4742.07	4805.20
450 MW için (\$/h)	5466.39	5467.03	5514.81
500 MW için (\$/h)	6246.73	6241.47	6363.42

‘*’ En başarılı yöntem

Çizelge-6’da, adım sayısını tamamlamak için gereken ortalama süre açısından algoritmalar karşılaştırılmış ve BB-BC algoritmasının, PSO ve IMO algoritmalarına göre daha hızlı sonuca ulaştığı gözlenmiştir.

Çizelge 6. Algoritmaların Ortalama Çalışma Süreleri (Run-Times of Three Methods)

Yöntem	Programın çalışma süresi (sn)		
	400 MW	450 MW	500 MW
BB-BC*	115.02	116.02	116.31
PSO	180.89	181.96	182.20
IMO	226.94	228.82	227.60

‘*’ En başarılı yöntem

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, rüzgar ve termik santrallerden oluşan örnek sistem üzerinde, enerji üretim maliyetine minimize etmeye amaçlayan ekonomik güç dağılım problemi için, ikisi (IMO ve BB-BC) yeni olmak üzere üç adet (IMO, BB-BC ve PSO) güncel algoritmanın performansı incelenmiştir. Elde edilen veriler ışığında BB-BC ve PSO algoritmaları başarılı bir performans sergilemiştir. Bulunan minimum maliyet değerleri açısından BB-BC ve PSO algoritmaları birbirine çok yakın değerlerde olup, süre bakımından BB-BC algoritması PSO algoritmasına göre 1 dakikadan daha az sürede algoritmayı tamamlayıp sonuca ulaşmıştır. Eğer büyük ve karmaşık bir problem üzerinde çalışılacaksa BB-BC algoritması, bulunduğu optimum sonuçlar ve minimum çalışma zamanı avantajı ile PSO algoritmasının bir adım ötesine geçebilir. BB-BC algoritmasının ilk fazında yaptığı sınırlı çözüm uzayı üzerindeki patlamalar nedeniyle büyük sıçramalar gözlenmiştir. Bunun nedeni sürekli değişen ağırlık merkezidir. Belli bir adım sonrasında BB-BC algoritmasının sıçramaları çok azalmış ve sınırlanmıştır. PSO ve IMO algoritmaları en iyi değerleri hep içerisinde tuttuğu için sıçrama yapmamış, direk olarak düşüşe geçmişlerdir. Problemin daha büyük boyuttaki sistemler üzerinde uygulanması ve algoritmalarda yapılacak iyileştirmeler ile, rüzgar santrallerinin yoğunlukla dahil olmaya başladığı enerji üretim pazarının, maliyet değeri açısından karşılaştırılmasında önemli kazanımlar elde edebileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Xia X., Eliaw A.M. “Optimal Dynamic Economic Dispatch of Generation: A Review”, *Electric Power System Research*, 80: 975–986, (2010)
- [2] Gaing Z.L. “Particle swarm optimization to solving the economic dispatch considering the generator constraints”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 18: 1187–1195, (2003)
- [3] Tran C.D., Dao T.T., Vo V.S., Nguyen T.T. “Economic Load Dispatch with Multiple Fuel Options and Valve

- Point Effect Using Cuckoo Search Algorithm with Different Distributions”, *International Journal of Hybrid Information Technology*, 8: 305–316, (2015)
- [4] Chen C.-L. “Optimal Wind-Thermal Generating Unit Commitment”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23: 273–280, (2008)
- [5] Patel M. “Wind and Solar Power Systems”, *CRC PRESS*, New York, (1999)
- [6] Özgönenel O., Thomas D.W.P., “Short-term Wind Speed Estimation on Weather Data”, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 20, 3 :335-346, (2012)
- [7] Arslan T., Bulut Y.M., Yavuz A.A., “Comperative study of numerical methods for determining Weibull parameters for wind energy potential”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40: 820-825, (2014).
- [8] Mert İ., Karakuş C., A., “Statistical Analysis of Wind Speed Data Using Burr, Generalized Gamma, and Weibull Distributions in Antakya, Turkey”, *Turk J Elec Eng & Comp Sci*, 23: 1571-1586, (2015).
- [9] Elektrik Piyasası Dengeleme ve Uzlaştırma Yönetmeliği,
<http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2015/03/20150328-7.htm>, Erişim Tarihi: 13.11.2015.
- [10] Hetzer J., Yu D.C., Bhattarai K. “An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23: 603–611, (2008)
- [11] YANG X.-S. “Nature-inspired metaheuristic algorithms”, *Luniver Press*, Frome, UK, (2010)
- [12] Peng C., Sun H., Guo J., Liu G. “Dynamic economic dispatch for wind-thermal power system using a novel bi-population chaotic differential evolution algorithm”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 42: 119–126, (2012)
- [13] Saadat H. “Power System Analysis”, *PSA Pub.*, New York, (2010)
- [14] Victoire T.A.A., Jeyakumar a. E. “Reserve constrained dynamic dispatch of units with valve-point effects”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20: 1273–1282, (2005)
- [15] Abuella M. “Particle Swarm for Optimal Power Flow Including Wind-Power”, *LAP LAMBERT Pub.*, Germany, (2012)
- [16] Erol O.K., Eksin I. “A new optimization method: Big Bang-Big Crunch”, *Advances in Engineering Software*, 37: 106–111, (2006)
- [17] Tabrizian Z., Afshari E., Amiri G.G., Ali Beigy M.H., Nejad S.M.P. “A new damage detection method: Big Bang-Big Crunch (BB-BC) algorithm”, *Shock and Vibration*, 20: 633–648, (2013)
- [18] Camp C. V “Design of Space Trusses Using Big Bang–Big Crunch Optimization”, *Journal Of Sturactural Engineering*, 133: 999–1008, (2007)
- [19] Kennedy J., Eberhart R. “Swarm intelligence”, *Morgan Kaufmann*, San Francisco, (2001)
- [20] Silberberg M.S. “Chemistry: The Molecular Nature of Matter and Change”, *McGraw-Hill*, New York, (2007)
- [21] Javidy B., Hatamlou A., Mirjalili S. “Ions motion algorithm for solving optimization problems”, *Applied Soft Computing*, 32: 72–79, (2015)
- [22] Weber J.D. “Implementaiont of a Newton based Optimal Power Flow into a a Power System Simulation Environment”, *MSc Thesis*, University Of Illinois, Electrical Engineering, (1997)

Araç Gövdesi Mimari Kesitlerinin Parametrik Tasarımı

İbrahim UTANIR, Özgür ÖZTÜRK, Emre DORUK

TOFAŞ, Türk Otomotiv Fabrikası A.Ş. 16369 , BURSA
(Geliş / Received : 02.10.2015 ; Kabul / Accepted : 24.11.2015)

ÖZ

Bu çalışmada, yeni bir sistem geliştirilmiştir. Sistemde araç stil geliştirme sürecinin en önemli aşamalarından olan gövde yapılabirlik çalışmalarında, araç gövdesi mimari kesitlerinin, halihazırda kullanılan alışlagelmış tekrarlı yöntemlere kıyasla çok daha kısa sürede oluşturmak amacıyla parametrik tasarım tekniğine dayalı bir metodoloji geliştirilmiştir. Aynı zamanda bu metodolojinin kullanımı için, Unigraphics CAD programı ile bütünleşik çalışan bir yazılım geliştirilmiştir. Çalışma sonunda, TCAE/UG ortamında çalışan parametrikleştirilmiş kesit yazılımı, gövde yapılabirlik sürecini standartlaştırarak tasarımcıya hız kazandırmıştır. Sistemde bulunan kesit mimarileri mevcut araçlarda denenmiş ve başarılı bulunmuş kesitler olduğundan tasarımcı kaynaklı hatalar minimize edilerek sürecin güvenilirliği ve kalitesi artırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Parametrik tasarım, bilgi tabanlı mühendislik, stil yapılabirliği

Parametric Design of Vehicle Body Architectural Sections

ABSTRACT

In this study, a new system is developed. Aim of this project is to create a parametric modeling methodology to facilitate creating vehicle architectural 2D body sections by using a software which works in UniGraphics. These sections, which created parametrically by using this methodology, can also be modified easily with various of design changes, including vehicle dimensional changes, vehicle and component changes and also style changes etc. Development time was reduced, process was standardized consequently the design quality was improved and the development cost was reduced..

Keywords: Parametric design, knowledge based engineering, sytle feasibility

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Komple yeni bir gövdenin tasarımı, çok yoğun ve karmaşık bir faaliyetler zinciridir. Gövdeyi oluşturan parçaların fonksiyonlarını yerine getirmesinin garanti edilebilmesi, bir dizi sanal ve fiziksel doğrulamaları ve sonuçlara göre yeniden gözden geçirme ve müdahaleleri gerektirir. Bunun haricinde, monte edilebilirlik, kaynak edilebilirlik, kalıba hazırlanabilirlik gibi teknolojik yapılabirlik kriterleri de göz önünde bulundurulmak zorundadır [1, 2].

Ürün geliştirme süreci, başlangıcında gerçekleştirilen yapılabirlik çalışmaları, stil yüzeylerinin, homologasyon normları ve ilk ürün ağacında belirtilen temel hedefler açısından sorun yaratıp yaratmadığının, teknolojik olarak yapılabirliğinin, maliyet hedeflerine ulaşılabilirliğinin ve ürün ortaklaştırılması amacıyla kullanımı düşünülen parçaların yapılabirliğini görülmesi için yürütülen fizibilite çalışmalarıdır [3].

Yeni bir araç için stil geliştirme süreci kritik bir süreç olup, yapılabirlik (stilin endüstriyelmesi) çalışmasını yürüten ekip tarafından stil - yapılabirlik analizi - stil şeklinde bir döngü içerisinde yürütülmektedir. Yapılabirlik analizini yürüten tasarımcı ekip, stil bilgisinden hareketle araç gövdesi üzerindeki kritik kesit

analizlerini gerçekleştirerek, gövde ve alt sistem mimarilerini ve kesit geometrilerini tasarlar ve stil ekibine geribildirimde bulunur. Yapılabirlik sürecinde tasarımcı ekibin stil değişikliklerini çok hızlı analiz ederek stile geribildirimde bulunması gerekmektedir. Geri dönüşlerin sıkça yaşandığı söz konusu süreç bu yüzden projenin boyutuna bağlı olarak 4-5 ay gibi uzun bir zaman dilimini kapsamaktadır. Bu süreçte yapılan olası hatalı öngörüler genelde bir sonraki adım olan gövde alt sistem ve detay bileşen tasarım sürecinde veya ilk fiziksel testler sonucunda görülebilmekte ve maliyeti yüksek geri dönüşler yaşanabilmektedir [3, 4].

Bu çalışmada, araç gövde stilinin doğrulanması sırasında ihtiyaç duyulan mühendislik kesitlerinin daha hızlı ve daha kolay tasarımı yapabilecek bir sistem geliştirilmiştir. TCAE/UG ortamında çalışan bu sistemin temelinde “parametrik tasarım” metodolojisi bulunmaktadır. Bu metot ile parametrik hale getirilen gövde mühendislik kesitlerinin, gövde yapılabirlik sürecine etkisi incelenmiştir. Geliştirilen sistem Unigraphics NX programında çalışmaktadır [5]

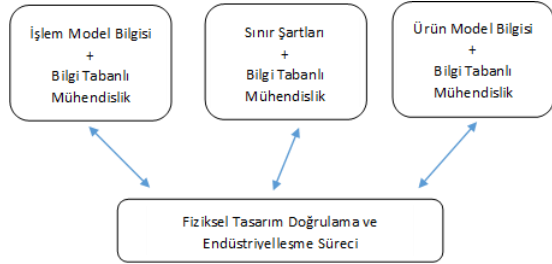
Bilgisayar destekli tasarım ve mühendislik uygulamalarında kullanılan metotlar; parametrik tasarım ve bilgi tabanlı mühendislik içermektedir. Bilgisayar destekli tasarım yapan yazılımların çoğu geometrik modellerde parametrik tasarım yapmaya imkan vermektedirler [6-7].

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: emre.doruk@tofas.com.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 269-274

Bilgi tabanlı mühendislik, otomasyon veya mühendislik çözümlerinde sıklıkla kullanılan bir metottür. Tasarım uygulamalarında da geniş ölçüde kullanılabilir. Bilgi tabanlı mühendislik uygulamaları ile tasarımda kullanılan mevcut parametreler ve kesitler gelecek tasarımlarda kullanılabilir. Literatürde tasarımda kullanılan bilgi tabanlı metotlar QFD, CADET ve PRM'dir [8-10]. Bu metotlar tasarımların yeniden kullanılabilirliği üzerine yaklaşımlar getirmektedir. Şekil 1.1'de bilgi temelli mühendisliğin temelleri gösterilmektedir.

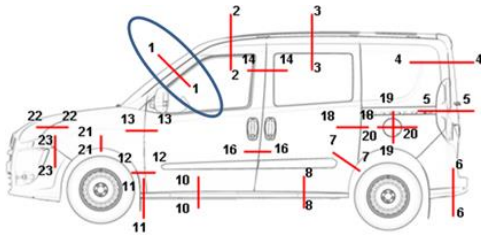


Şekil 1.1. Bilgi tabanlı mühendisliğin temelleri (Fundamental of knowledge based engineering)

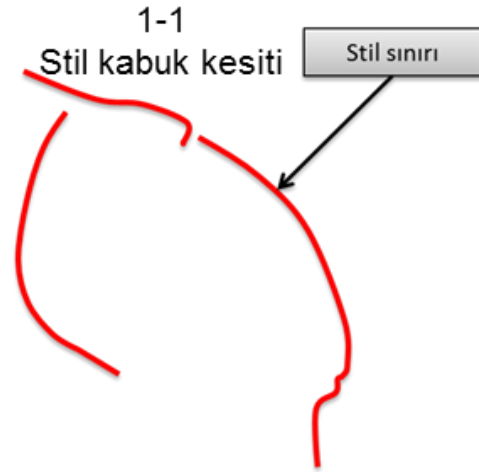
Literatürde var olan çalışmalar incelendiğinde parametrik tasarım ve yeniden kullanılabilir tasarım ile ilgili bir çok çalışma var olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, araç gövdesi mimari kesitlerinin parametrik olarak modellenmesi ile aynı modellerin yeni geliştirilecek araç projesinde sürekli kullanılmasını sağlanabilen bir metodoloji geliştirilmiştir.

2. YAPILABİLİRLİK KESİTLERİ (FEASIBILITY CROSS-SECTION)

Mevcut gövde geliştirme sürecinin stil yapılabirlik aşamasında (tasarım başlangıç adımı-Step1 öncesi) bir araç gövdesi için yaklaşık 40 adet kritik yapılabirlik kesitinin oluşturulması ve doğrulanması için standart mimari kesitler veya geçmiş projelerden alınan kesitler kullanılmaktadır. Bu kesitler parametrik olmadıkları için temin edilmeleri, 3 boyutlu ortamda yerleştirilmeleri ve yeni stile göre uyarlanma aşamaları zaman almaktadır. Şekil 1.2 de (A direk) kesit görünüşü, bölgedeki tüm parçalarla birlikteki haliyle (kesit 1-1) görülmektedir. Projenin yapılabirlik çalışması esnasında çalışan proje sorumlusu ve tasarımcı tarafından diğer projelerdeki 1-1 kesitleri incelenerek mevcut tasarım yöntemleri kullanılarak optimum kesit oluşturulması beklenmektedir.



Şekil 1.2. Gövde mühendislik kesitlerinin kritik yerleri (Critical points of body cross-sections)



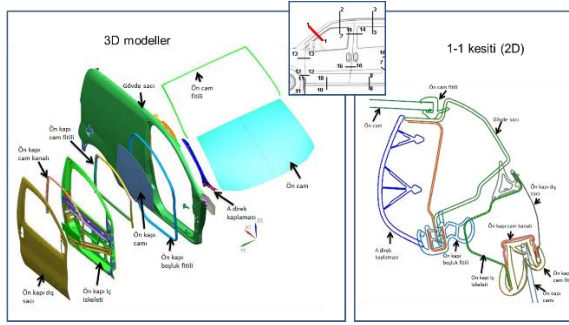
Şekil 1.3. Örnek stil kabuğuna ait içi boş kesit (An example for hollow cross-section of style shell)



Şekil 1.4. Örnek kesit detay gösterimi (Detail demonstration for sample cross-section)

Şekil 1.3'de örnek bir stil kabuğuna ait içi boş kesit görülmektedir. Şekil 1.4'de ise kesitin detay geometrisi gösterilmektedir.

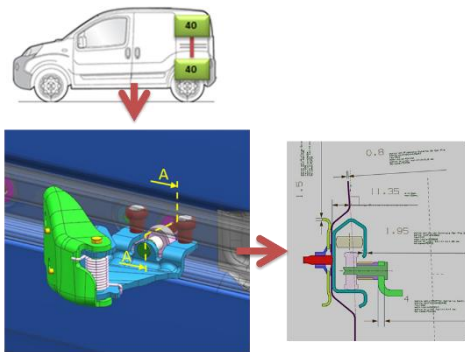
Bu işlemi bilinen yöntemlerle yaparken diğer projelerdeki kesitleri bulmak ve incelemek 6 aşamalı karmaşık bir süreç olup örneğin 1-1 kesitinin oluşturulması için geçen süre ortalama 2.5 saattir. Tasarımcı, tüm bileşenlerin numaralarını tek tek bulması ve bu montaj bileşenlerinin ayrı bir dosyada toplayarak açması gerekmektedir. Şekil 1.5 de 3D modellerden elde edilen kesitler görülmektedir.



Şekil 1.5. Örnek 3D CAD modeller ve kesiti (Sample of 3D CAD models and cross-sections)

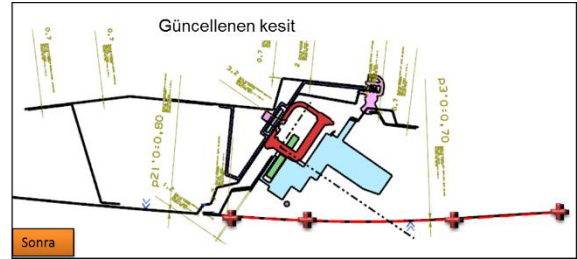
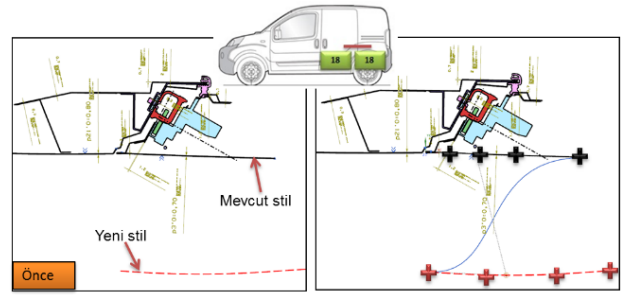
3. GELİŞTİRİLEN SİSTEM (DEVELOPED SYSTEM)

Metodolojinin temelinde standart mimari kesitlerin geometrik şeklini oluşturan ölçülerinin parametrik hale getirilmesi ve stil çalışmalarında bu şekilde gövde yapılabirlik çalışmalarının hızlandırılması yer almaktadır. Bir geometrik şeklin parametrik hale getirilmesi demek geometrik şekli oluşturan tüm ölçülerin yani parametrelerin tanımlanması ve tüm geometrinin bu ölçüler yani parametreler ile ilişkilerinin tanımlanmasıdır. Geçmişte tasarımı yapıp üretmekte olduğumuz mevcut modellerde edindiğimiz tecrübe ve bilgi birikimlerinden bundan sonraki projelerde de faydalanabilmek amacıyla bir yapılabirlik kesitleri parametrik hale getirme çalışması yapılmıştır. Bunun için her bir kesit, diğer kesitlerle geometri ve boyut açısından ilişkilendirilip, bu sayede geometrilerin anlamlı bir şekilde güncellenmesi sağlanmıştır. (Şekil 1.6).

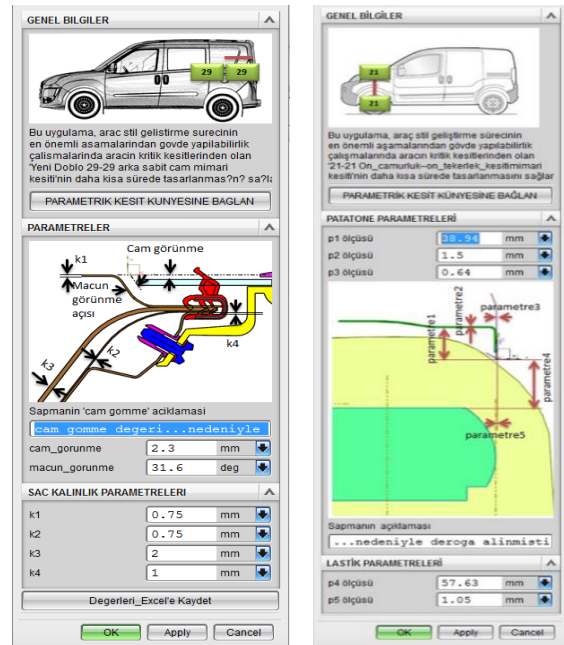


Şekil 1.6. Parametrik kesit (Parametric cross-section)

Bu çalışma ile değişken geometri veya denklemleri içeren tasarım problemlerinin çözümünde de büyük kolaylık sağlamaktadır. Aynı parametrik modeller, bundan sonra yapılacak olan diğer ürün geliştirme projelerinde tekrar kullanılabilir. Aynı zamanda stil bilgisi değiştiğinde kesiti oluşturan tüm geometriler anlamlı bir şekilde güncellenmektedir (Şekil 1.7).



Şekil 1.7. Parametrik kesit ve yeni stile adaptasyon (Parametric cross-section and new style adaptation)



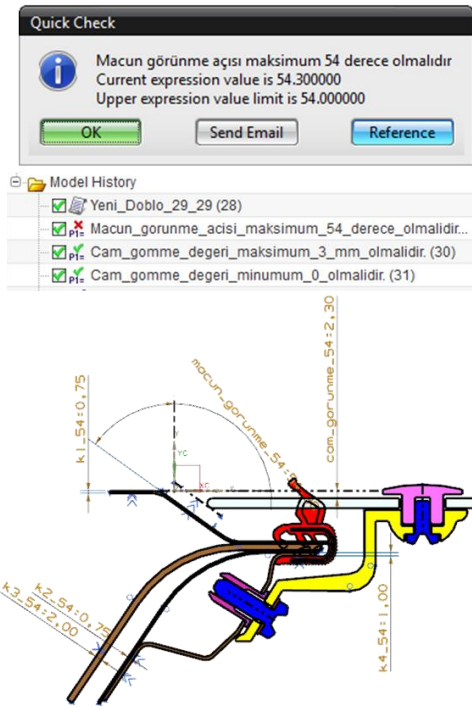
adaption)

Şekil 1.8. Tam parametrik kesit parametre giriş menüsü (Input menu of cross-section parameter)

Unigraphics içinde çalışan bir yazılım oluşturmak için kaynak kodlar yazılarak yazılım oluşturuldu. Böylelikle, her tasarımcının kolay ve hızlı bir şekilde ulaşabileceği bilgi bankası oluşturuldu. Geçmiş çözümlerden yararlanma imkanı sağlanmış oldu. Bunun için UG içerisinde yazılım geliştirme araçlarından olan "knowledge based engineering" ile yazılımı oluşturuldu. Oluşturulan yazılım, tasarımcı tarafından istenilen araç tipi ve bölge kesiti seçildiğinde, kesitin parametrik olarak uygun pozisyona hızlı bir şekilde otomatik olarak

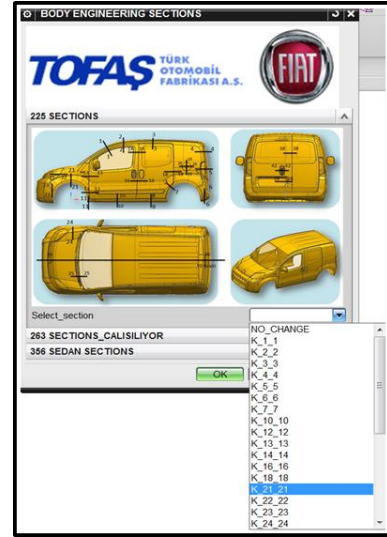
sanal ortamda konumlandırılması sağlandı. Böylece süreç karmaşası ve zaman kaybının önüne geçilerek, projenin ilerleyen aşamalarında ilgili bölgede yaşanabilecek hataların önüne geçilmesi sağlandı. Oluşturulan modül yazılımına ait kesit ara yüz örnekleri Şekil 1.8'de görülmektedir.

Bununla birlikte parametrik ölçülerin değişim kontrolleri yapabilmek amacıyla ilave kodlar geliştirildi. Bu kodlar yardımıyla değişken ölçülerin kullanıcı tarafından girilen değerlerin alt limit üst limit sınırları belirlenip UG içinde mesaj penceresi oluşturuldu. Giriş yapılan parametre değeri alt limit yada üst limit değerinden farklı olduğu takdirde tasarımcıyı yönlendirmektedir ve ürün ağacında hata mesajı yer almaktadır (Şekil 1.9).



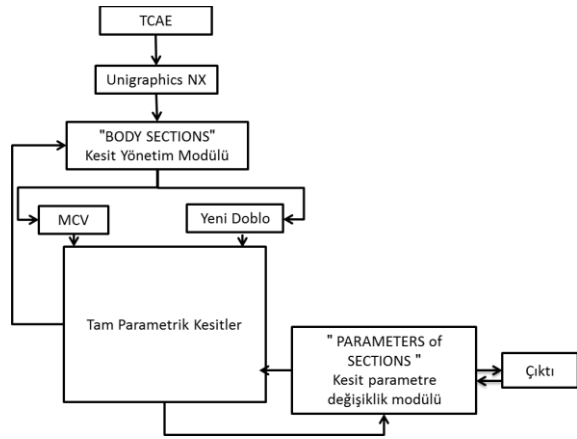
Şekil 1.9. Kullanıcı uyarı penceresi (User warning window)

Geliştirilen tüm kritik mühendislik kesitlerini montaj modelleme yöntemiyle yönetebilmek amacıyla bir ara yüz geliştirildi (Şekil 1.10). Bu sayede parametrik kesitler TCAE de hızlı bir şekilde UG tasarım ortamında eklenip çıkartılarak çalışabilecektir.



Şekil 1.10. TCAE kesit yönetme modülü (TCAE cross-section management module)

Sistem algoritmasında, ilk karar verilmesi gereken nokta sistemin çalışılacak stilin hangi mimariye uygun olduğunu belirlemektir. Geliştirilen sistemde MCV yada ticari araç stiline uygun olan kesitler bulunmaktadır. Stile en uygun kesit belirlendikten sonra parametre girişleri yapılabilir. Geliştirilen sistemin akış şeması Şekil 1.11'de görülmektedir.



Şekil 1.11. Geliştirilen sistemin yöntem tanımı (Method definition of developed system)

4. SİSTEM UYGULAMASI (SYSTEM IMPLEMENTATION)

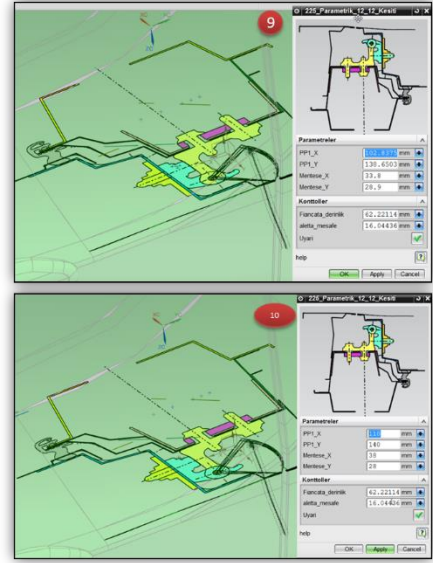
Şekil 1.12 ve Şekil 1.13’de geliştirilen sistem ve uygulama örneği görülmektedir. Bu uygulamada Ticari araç stiline, MCV kesiti uyarlanmıştır.

- 1- Stil dosyası (Ticari araç)
- 2- Çalışılacak kritik bölge (alt menteşe)
- 3- TCAE ara yüzü
- 4- Geliştirilen Kesit yönetim modülü (Body Engineering Sections)
- 5- Tam parametrik kesit çıktısının modele eklenmesi
- 6- Yeni stilden eğri oluşturma
- 7- Tam parametrik kesitin yeni stile göre güncellenmesi
- 8- Mühendislik kesitinin araç üzerindeki yeri
- 9- Geliştirilen kesit iç parametrelerine ait ara yüz (Parameters of Sections)
- 10- Güncellenen kritik ölçüler

İlk olarak ticari araç stil dosyası UG tasarım ortamında açılır. Sonra komponent yönetimi için geliştirilen ve TCAE ile entegrasyonu sağlanan “Body Engineering Sections” yazılımı çalıştırılır. Kullanıcı arayüzü yardımıyla çalışılacak bölge kesiti olan alt menteşe kesit numarası seçilir, otomatik olarak ekrana tam parametrik alt menteşe kesiti gelir. Ticari araç stil dosyasından ilgili bölgede stil çizgisi oluşturulur. Tam parametrik olarak geliştirilen alt menteşe kesitinin mevcut eğrisi, sürüklenerek ticari araç çizgisiyle eşleştirilir, kesit modeli ticari araç stiline uyarlanmış olur. Daha sonra her bir kesit iç parametrelerini tekrar düzenlemek için geliştirilen “Parameters of Sections” yazılımı çalıştırılır. İç parametreler kullanıcı ara yüzünden değiştirilerek kesit nihai duruma getirilir.



Şekil 1.12. Uygulama örneği-kesit seçimi (Example of application-selection cross-section)

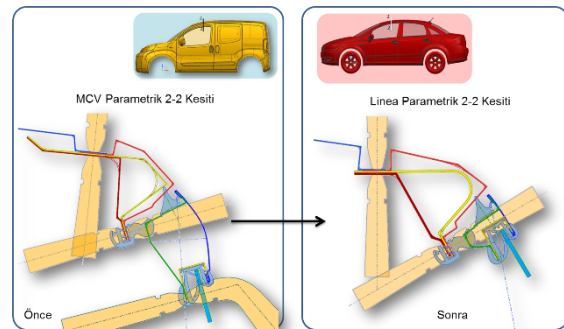


Şekil 1.13. Uygulama örneği-parametre değişimi (Example of application-changing parameter)

5. SONUÇLAR (RESULTS)

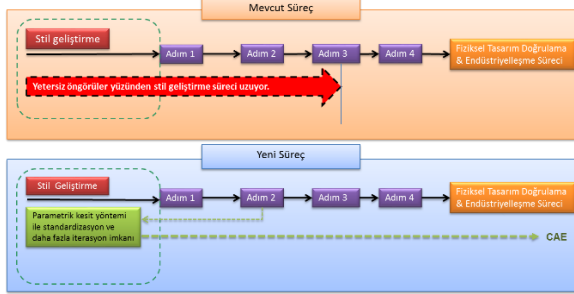
Bu çalışmada, 72 yapılabirlik kesiti geliştirilmiştir. Geliştirilen tam parametrik kesitler yeni bir aracın gövde geliştirme sürecinde stil yapılabirlik çalışmalarında kullanılabilir. Geliştirilen sistem TACE/UG bütünleşik çalışarak stil doğrulama çalışmalarındaki tasarım süreleri azaltılmıştır. Projede geliştirilen parametrik metodoloji sayesinde gerçekleştirilecek zaman tasarrufları, yapılabirlik süreçlerinde standardizasyon ve insan kaynaklı hataların minimuma indirgenmesine doğrudan hizmet edecektir.

Ticari araç ve MCV modellerine göre oluşturulan parametrik kesitler sedan stiline göre denendi. Geri bildirimlere göre düzeltmeler yapıldı. MCV Parametrik kesitler kullanılarak sedan stil bilgisine göre yapılabirlik analizleri gerçekleştirildi. Çalışma sonucunda mevcut yöntemler kullanıldığı takdirde 9 saat süren fiziksel tasarım doğrulama ve endüstriyelleşme süreci, yeni geliştirilen yazılım ile 0.5 saate düşürülmüştür. Verim ~ %94 dür (Şekil 1.14).



Şekil 1.14. Sedan stiline göre uygulanmış MCV parametrik kesiti (Implementation parametric cross-section of MCV to sedan style)

Bununla birlikte ilk stil çalışmalarıyla başlayan ürün geliştirme sürecinde stilin yapılabilirliğini (endüstriyelendirilebilirliği) hızlı bir şekilde analiz edilmesini sağlayan ve CAD ortamında çalışan yazılım süreç yeniliği sağlanmıştır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15. Yeni geliştirilen süreç (Newly developed process)

Adım-1: %70-80 civarında yapılabilir olduğu onaylanmış stil kabuk matematik modeli ve kritik gövde kesitleri

Adım-2: 3D matematik modeller

Adım-3: Prototip yapımında kullanılacak ve CAE tarafından doğrulanmış 3D matematik modeller

Adım-4: Seri imalat kalıplarının yapılacağı 3D matematik modeller

Tasarım sistemi ile geliştirme sürecinde araç gövdesi üzerinde kritik kesitler için parametrik bağlantıların kurulduğu, geometrik kısıtlamalar ile tasarım kurallarını içeren modüler bir sistemin olduğu, tasarımın sürecinde tasarım ve değişiklik süresini azaltan, tasarımın tarihçesini (ürün ağacı biçiminde) kaydederek aynı parametrik modelleri yeni geliştirilecek araç projesinde sürekli kullanılması sağlanabilen bir metodoloji geliştirilmiştir. Bununla birlikte kesit kütüphanesi kavramı oluşturularak, geçmiş tecrübelerden hızlı bir şekilde yararlanma imkanı sağlanmıştır. Bu sayede araç gövdesi stil yapılabilirlik sürecinde standartlaşma sağlanmıştır.

Yeni devreye alınacak araç modelleri için parametrik hale getirilmiş yapılabilirlik kesit kütüphanesi ve parametrik düğüm noktası modülleri oluşturuldu. Kesitlerin tümüne hızlı ve tam parametrik şekilde ulaşılma olanağı sağlandı. Proje ile yeni bir araç projesinde kullanılan mevcut tasarım programı Unigraphics NX altında çalışan bir sistem haline getirildi. Bununla birlikte düğüm noktalarına ait kesit ve süpürme yüzeyleri tam parametrik duruma getirilerek yazılım geliştirildi.

Bu çalışmada, araç stil geliştirme sürecinin en önemli aşamalarından olan gövde yapılabilirlik çalışmalarında, araç gövdesi mimari kesitlerinin ve düğüm noktalarının, halihazırda kullanılan alışlagelmiş tekrarlı yöntemlere kıyasla çok daha kısa sürede oluşturulmasına ve geometrik optimizasyonuna olanak tanıyan, parametrik tasarım tekniğine dayalı bir metodolojinin ve bu metodolojinin kullanımı için, Unigraphics CAD

programı ile bütünleşik çalışacak bir yazılım gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen metodoloji ve yazılım, araç geliştirme projelerinin tümünde kullanılmaktadır.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

CAD: Computer Aided Design

TCAE/UG: Team Center Automotive Engineering/Unigraphics

2D: Two dimension

3D: Three dimension

MCV: Medium Commercial Vehicle

QFD: Quality Function Deployment

CADET: A flexible rule based system

PRM: Product Range Model

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, 3110531 proje kodlu Araç Gövdesi Mimari Kesitlerinin Ve Düğüm Noktalarının Parametrik Tasarımı ve Optimizasyonu adlı proje kapsamında Tübitak desteği ile gerçekleştirilmiştir. Yazarlar Tübitak'a ve Tofaş Ar-Ge merkezine teşekkür etmektedirler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Araç Gövdesi Mimari Kesitlerinin Ve Düğüm Noktalarının Parametrik Tasarımı Ve Optimizasyonu, TEYDEB 1501, Proje Kodu: 3110531.
2. Utanır İ., Durgun İ., Özgür Ö., "Unigraphics NX ile Parametrik Tasarım", 5. Otomotiv Teknolojileri Kongresi, Bursa, (2010).
3. Utanır İ., Durgun İ., Özgür Ö., M., "Tasarımda Otomasyon Teknikleri" 12. Otomotiv ve Üretim Teknolojileri Sempozyumu, Bursa, (2011).
4. Utanır İ., "Unigraphics NX2 Mekanik Modelleme ve Montaj", *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara, (2005).
5. Güllü A., Utanır İ., Gülesin M., "Unigraphics NX ile Modelleme", *Asil Yayın Dağıtım*, Ankara, (2003).
6. Andrews, P., Shahin, T. and Sivaloganathan, S., "Design reuse in a CAD environment- Four case studies", *Computers & Industrial Engineering*, 37: 105-109, (1999).
7. Shahin, T.M.M., Andrews, P.T.J. and Sivaloganathan, S., "A design reuse system", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 213: 621-627, (1999).
8. Rodgers, P.A., Caldwell, N.H.M., Clarkson, P.J. and Huxor, A.P., "The management of concept design knowledge in modern product development organizations", *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 14, 1. 108-115, 2001.
9. Rodgers, P.A., Huxor, A.P. and Caldwell, N.H.M. "Design Support Using Distributed Web-Based AI Tools", *Research in Engineering Design*, 11: 31-44, (1999).
10. Costa, C.A. and Young, R I M, "Product range models supporting design knowledge reuse", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B - Engineering Manufacture*, 215: 323-338, (2001).

Tozaltı Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Petrol ve Doğalgaz Borularının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Hakan ADA¹, Sinan AKSÖZ¹, Tayfun FINDIK², Cemil ÇETİNKAYA², Mehmet GÜLSÜN¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Met. Mater. Eng. Ankara, Turkey

(Geliş / Received :14.10.2015 ; Kabul / Accepted :08.02.2016)

ÖZ

Bu çalışmada; farklı çelik üreticileri tarafından biri doğalgaz (X52), diğeri ise petrol boru hatları için üretilmiş (X65) aynı karbon eşdeğerliğine sahip X52 ve X65 kalitede rulo sac malzemeler boru haline getirilerek tozaltı ark kaynak yöntemi ile birleştirilmiştir. Elde edilen birleştirmelerden alınan kaynaklı numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, numunelere kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe testleri uygulanmıştır. Kaynaklı birleştirmelere yapılan mekanik testler ile makro ve mikroyapı incelemeleri sonucunda, ince taneli yapıya sahip olan petrol boru hattı için üretilen X65 malzemenin çekme dayanımı ve kaynak metali sertliğinin, nispeten daha iri taneli olan ve doğalgaz boru hattı için üretilen X52 malzemeden daha yüksek olduğu ve tokluk değerlerinin ise daha düşük olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: API, tozaltı kaynağı, tane boyutu, mikroyapı.

Investigation of Microstructure and Mechanic Properties of Petroleum and Natural Gas Pipeline Weldment by Submerged Welding Processes

ABSTRACT

In this study, roll sheet materials that were produced for natural gas and oil pipelines by different steel producers, have the same carbon equivalent, X52 and X65 quality were turned into pipe. These materials were combined with submerged arc welding method. Microstructure and mechanical properties of weld samples which taken from combined pipes were investigated. In experimental studies, chemical analysis, hardness tensile, notch-impact tests were performed. The macro-microstructure and mechanical test investigations for the samples taken from welded joints showed that tensile strength and weld metal hardness of X65 material produced for oil pipeline and have fine-grained structure were higher than that of X52 material produced for gas pipeline and have coarser-grain structure. On the other hand, the toughness values of X65 material were lower than that of X52 material.

Keywords: API, submerged arc welding, grain size, microstructure.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

IEO'nun (The International Energy Outlook), 2008 yılında yapmış olduğu bir araştırmada, 2008 itibariyle global enerji ihtiyacının %34,6'sını karşılayan petrolün 2030 yılında toplam enerji tüketimindeki oranının % 33 olması beklenmektedir. Son yıllarda büyük oranda artış gösteren doğalgaz talebindeki artış sürerken, petrol talebinde dikkat çekici bir artış beklenmemektedir. [1]. Ulaşım dışındaki diğer tüm alanlarda petrolün en güçlü rakibi haline gelecek olan doğalgazın kullanımının ise 2020'de ikiye katlanarak 5 trilyon m³'e ulaşacağı ön görülmektedir [2]. Böylesine hem ekonomik, hem de stratejik önemi bulunan petrol ve doğalgazın buldukları kaynaklardan çıkarılarak ayırma istasyonlarına, ayırma işleminden çıkan ürünlerine

kullanım yerlerine taşınmaları gereklidir. Yüksek basınçlarla gerçekleştirilen bu taşıma işlemi ise büyük çaplı çelik borular ile yapılmaktadır.

Tozaltı ark kaynağında kaynak metali; ana malzeme, ilave edilen kaynak teli ve tozunun, yüksek sıcaklıklarda ergimesi sonucu oluşur [3, 4, 5]. Tozaltı kaynağında ark, tel sürme ünitesiyle kaynak bölgesine otomatik olarak gelen tel elektrot ile birleştirilecek parçalar arasında oluşur ve kaynak bölgesi bir toz kütlesi tarafından korunur [6,7]. Tozaltı kaynak yöntemi, kalın kesitli malzemelerin kaynağında üstün performans, yüksek metal yığıma kapasitesi, düzgün kaynak dikiş formları, yüksek nüfuziyet derinliği, işçilik, enerji, zamandan tasarruf ve yüksek kaynak hızı gibi avantajları nedeniyle günümüz endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir kaynak yöntemidir [5,8].

Günümüzde üretilen hat borularının çoğu API (American Petroleum Institute) standardına göre üretilmektedir

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: hakanada@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 275-282

Amerikan Petrol Enstitüsü tarafından yayınlanmakta olan API 5L standardında öngörülen boru ve çelik malzemeler tüm dünyada petrol ve gaz boru hatlarında kullanılmaktadır. API 5L standardı ürün spesifikasyon seviyesi & hizmet koşulları için malzemelerin teslim koşulunu (kara, deniz aşırı, asidik ortam, vb. gibi) ve çelik kalitelerini; normalleştirilmiş, su verilmiş, termomekanik olarak haddelenmiş, vb. gibi tanımlamaktadır. Bu standart, dikişsiz ve dikişli boruları kapsamaktadır. Dikişli borular genellikle ark kaynak yöntemleri ile boyuna ve spiral dikişli olarak üretilirler [9]. Doğalgaz ve petrol boruları gerek on-line gerekse off-line kontrollerin yanı sıra, DWTT (Drop Weight Tear Test) işlemleri de dâhil olmak üzere birçok tahribatlı ve tahribatsız testlerden geçirilmektedirler. Proje gereksinimleri ve kullanım alanlarına bağlı olarak; alaşım, mikroalaşım veya özel imalat çelikleri kullanılmaktadır. Üretim için seçilecek malzemeye temel oluşturmak amacıyla projeye özgü bir şartname hazırlanır. Amaç, sağlam ve sünek olmanın yanı sıra, şekillendirme, kaynak ve bükme için uygun homojen ince taneli mikroyapıyı elde etmektir.

API borularının üretildiği malzemeler ince taneli yapı çelikleridir. Bu malzemeler genellikle X sınıfında değerlendirilmekte ve tane yapısına göre sınıflandırılmaktadır. X42, X46, X52, X65 ve X70 gibi malzemeler doğalgaz ve petrol boru hatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. API standardında X sınıfında değerlendirilen malzemelerin ana özelliği, ince taneli ferrit ve perlit yapılarının termomekanik işlemler sonucunda elde edilmesidir. Bu sınıflandırma işleminde X'in yanında bulunan malzeme numarası yapı içerisindeki alaşım elementleri oranına göre değişmekte, X'in yanındaki numara arttıkça mikroyapıların daha ince yapılardan oluştuğu görülmektedir. İnce taneli yapı çeliklerinde ana

birleştirilmiştir. X65 ve X52 malzemeler farklı mikroyapılara sahiptirler. Farklı tane boyutlarındaki her iki malzeme tozaltı ark kaynağıyla birleştirilmiş ve elde edilen birleştirmelerden alınan kaynaklı numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda, numunelere kimyasal analiz, sertlik, çekme, çentik - darbe testleri uygulanmıştır. Ayrıca, kaynaklı birleştirmelerin makro ve mikroyapı fotoğrafları çekilerek, kaynak işleminin mekanik özelliklere olan etkileri araştırılmıştır.

2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Deneylerde, sürekli döküm yolu ile imal edilmiş, termomekanik haddelemeye tabi tutulmuş, hidrojen kırılabilirliğine karşı yüksek dirençli, API 5L standardında üretilen ve aynı karbon eşdeğerliğine sahip (% 0,26) X52 (A numunesi) ve X65 (B numunesi) çeliği kullanılmıştır.

Önemli bir parametre olan karbon eşdeğerliği her iki malzemede hemen hemen aynı (% 0,26) seçilerek mekanik özelliklerin tane boyutuna bağlı olarak gösterdiği değişimin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Sac malzemeler, Borusan Mannesmann'ın İzmit'teki fabrikasında Çizelge 1'deki kaynak parametrelerine uygun olarak, tüm elektriksel ekipmanları Lincoln Electric tarafından tasarlanan otomatik tozaltı kaynak makinasında spiral şeklinde kaynatılarak boru haline getirilmiştir. Kaynak makinesi; 273,1 mm (10") - 3048 mm (120") boru çap aralığında 4,0 ile 25,0 mm kesit kalınlığındaki boruları kaynatabilen, DC redresörler maksimum 1500 A akım, AC redresörler ise maksimum 1200 A akımda çalışabilmektedir. Kaynak hızı 0,25 ile 3,20 m/dk. arasında değişmekte olup, iç kaynakta üç kafa, dış kaynakta ise iki kafayı ayna anda kullanım

Çizelge 1. Deney Parametreleri (Test Parameters)

Malzeme	Kullanılan Kaynak Teli	Kaynak Bölgesi	Tel çapı (mm)	Hız (cm/dk)	Akım Tipi	Amper (A)	Ark Gerilimi (V)
API 5L X 52 kalite evsafında, (16") 406,4x6,4 mm boyutlu doğalgaz borusu – A numunesi	S2Mo	İç Kaynak	3,2	170	DC +	675	29
		Dış Kaynak	3,2	170	DC +	700	29
API 5L X 65 kalite evsafında, (42") 1067x11,91 mm boyutlu petrol borusu – B numunesi	S3Mo	İç Kaynak	4,0	200	DC +	850	27
			3,2	200	AC1	700	27
			3,2	200	AC2	475	29
		Dış Kaynak	3,2	200	DC +	850	29
			3,2	200	AC	575	29

mikroalaşım elementi, titanyum ve vanadyum ile kombinasyonu (Nb/V, Nb/Ti, and Nb/V/Ti) olan niyobyumdur. Bu yapılar çeliklerin akma gerilimini ve tokluğunu olumlu yönde etkilemektedir [10-12].

Bu çalışmada; biri doğalgaz boru hattı (X52 - A numunesi), diğeri ise petrol boru hattı için üretilmiş (X65 - B numunesi) X52 ve X65 kalitede rulo sac malzemeler boru haline getirilerek tozaltı ark kaynak yöntemi ile

olanağı vardır. Tel sürme işlemi, DC redresörlerde Lincoln NA-5, AC redresörlerde ise Lincoln NA-4 kontrol sistemi ile gerçekleştirilmektedir.

Kaynaklı birleştirmelerde P223 FX kaynak tozu, ilave tel olarak S2Mo ve S3Mo tel kullanılmıştır. Çizelge 2'de deney malzemelerinin, Çizelge 3'de kaynak tellerinin, Çizelge 4'de ise kaynak tozunun kimyasal analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 2. Deneylerde Kullanılan Malzemelerin Kimyasal Analizleri (Chemical Analysis of Materials Used in Experimental Studies)

Malzeme / %	Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	N	Al	Nb	Ti	Ceş
X52 Malzeme - A numunesi	98,6	0,09	0,22	0,93	0,010	0,004	0,01	0,02	0,03	0,006	0,035	0,028	0,001	0,26
X65 Malzeme - B numunesi	98,5	0,039	0,19	1,1	0,014	0,001	0,02	0,01	0,01	0,005	0,032	0,054	0,0022	0,26

Çizelge 3. Deneylerde Kullanılan Kaynak Tellerinin Kimyasal Analizi (Chemical Analysis of the Welding Wire Used in the Experimental Studies)

Kaynak Teli	Fe	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn	Al	V
S2Mo (A numunesi)	98,0	0,10	1,03	0,12	0,006	0,007	0,07	0,05	0,48	0,08	0,003	0,003	0,01
S3Mo (B numunesi)	97,5	0,09	1,65	0,16	0,008	0,006	0,02	0,02	0,51	0,03	0,002	0,002	0,01

Çizelge 4. Deneylerde Kullanılan P223 FX Türü Kaynak Tozunun Kimyasal Analizi (Chemical Analysis of the P 223 FX Fluxes Used in Experimental Studies)

P223FX	SiO ₂	MnO	MgO	CaF ₂	Al ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	K ₂ O	FeO	NaO	Metal Alaşımı
%	23	4	21	21	20	4	2	1	1	2	3 Maks.

Yapılan kaynak işlemlerinden sonra numunelere çekme, sertlik ve çentik - darbe (Charpy) testleri uygulanmış ve numunelerin makro ve mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Çizelge 1'deki kaynak parametrelerine bağlı kalına-rak yapılan deneylerden sonra her bir malzeme için deney numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler, standart meta-lografik numune hazırlama kurallarına uygun olarak sırasıyla 200, 400, 600, 800 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış, daha sonra % 3 Nital çözeltisiyle dağlanmış. Dağlanan numunelerin mikroyapı fotoğrafları LEICA marka optik mikroskop yardımıyla çekilmiştir.

Mikroyapı fotoğrafları çekilen numuneler, daha sonra sertlik ölçme işlemlerinde kullanılmıştır. Sertlik deneyleri Struers marka, Duramin A300 model, 0,100 – 31.250 kg kapasiteli, tam pinomatik, değişken yüke sahip, Vickers, Brinell, Rockwell cinsinden makro ve mikro ölçümler yapabilen bir cihaz yardımıyla yapılmıştır. Sertlik ölçme işleminde Vickers sertlik ölçme metodu kullanılmış ve yük olarak da boru imalatçıların kullandığı 10 kilogramlık bir ağırlık seçilmiştir. Her bir deney numunesinin üzerinden 15 ayrı bölgeden, 5 farklı noktadan sertlik değerleri alınmış, bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır.

Çekme numuneleri ise ASTM E8 standardına uygun olarak her bir kaynaklı malzeme için 5 adet çekme testi, 600 KN yük kapasitesine sahip Instron marka çekme cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kaynaklı birleştirmelerin maksimum çekme mukavemeti ve %

uzama değerlerine bakılmış ve numunelerin ortalama değeri hesaplanmıştır.

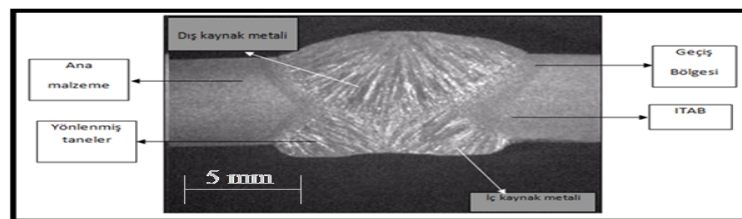
Çentik - darbe deneyleri maksimum 300 Joule enerji ölçebilen ve çarpma hızı 5,42 m/sn olan bir cihaz yardımı ile yapılmış olup, çentik - darbe deney numuneleri EN 10045'e göre sivri çentikli ISO-V şeklinde hazırlanmıştır. Numune soğutması sıvı banyo içinde $\pm 0,5$ °C hassasiyet ile yapılmış olup, sıvı banyo içinde tutulma süresi 7 dakikadır. Deneyler, -20 °C'de yapılmış olup numuneler cihaza çentik eksenine mesnet açıklığının tam ortasında ve çentikli yüzün çekicinin vuracağı yüzün ters tarafında olacak şekilde yapılmıştır. Deneylerde ana malzemeden ve kaynak bölgesinden alınan 5'er adet numunenin çentik - darbe sonuçları alınmış olup, ortalamaları hesaplanarak çentik - darbe deney sonucu hesaplanmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI ve TARTIŞMA

(EXPERIMENTAL RESULTS and DISCUSSION)

3.1. Makroyapı Analizleri (Macrostructure Analyses)

Kaynak işleminden sonra elde edilen makroyapı görüntüleri Şekil 1 ve Şekil 2'de verilmektedir. Genel olarak incelenen makroyapı fotoğraflarına bakıldığında kaynaklı birleştirmelerde tam nüfuziyet sağlanmış olup, makro düzeyde herhangi bir kaynak hatasına (yanma oluğu, gözenek, kalıntı, çatlak, v.b.) rastlanmamıştır. Ayrıca kaynak metali içerisindeki tanelerin, ana metal sınırlarından kaynak metali merkezine doğru yönelmesi



Şekil 1. X52 Doğalgaz Boru Numunesine (A) Ait Kaynak Metali Makroyapı Fotoğrafı (Macrostructure Image of Weld Metal of X52 Natural Gas Pipe Samples (A))

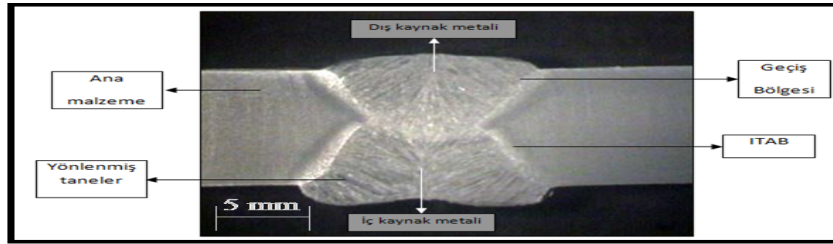
görülürken, ana malzeme, ITAB ve kaynak metali bölgeleri de net bir şekilde görülmektedir.

Şekil 1 ve Şekil 2’de verilen X52 ve X65 birleştirmelerine ait makroyapı fotoğrafları incelendiğinde, yapısal olarak benzerlik görülmektedir. Ancak Şekil 1’de görülen X52 malzemenin makro görüntülerinde sütunsal tanelerin daha belirgin ve kaba olduğu, ITAB’ların daha geniş olduğu görülebilmektedir. X52 ana malzemesinin, X65 ana malzemesine göre daha kaba taneli olduğu bilinmekte olup [10 - 12], yapılan çalışmadaki mikroyapı

geliştirilmesi ve muhtemel çatlak oluşumlarının engellenmesini sağlamaktadır [14–19].

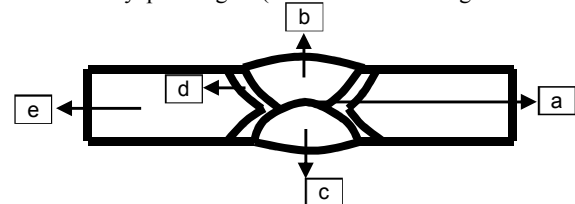
3.2. Mikroyapı Analizleri (Microstructure Analyses)

Şekil 3’de ana malzeme, ITAB, iç kaynak metali, dış kaynak metali ve kaynak metali şematik olarak verilmektedir. Şematik olarak verilen bölgelerden alınan mikroyapı görüntüleri ise Şekil 4 (X52- A numunesi) ve Şekil 5’de (X65 – B numunesi) görülmektedir.



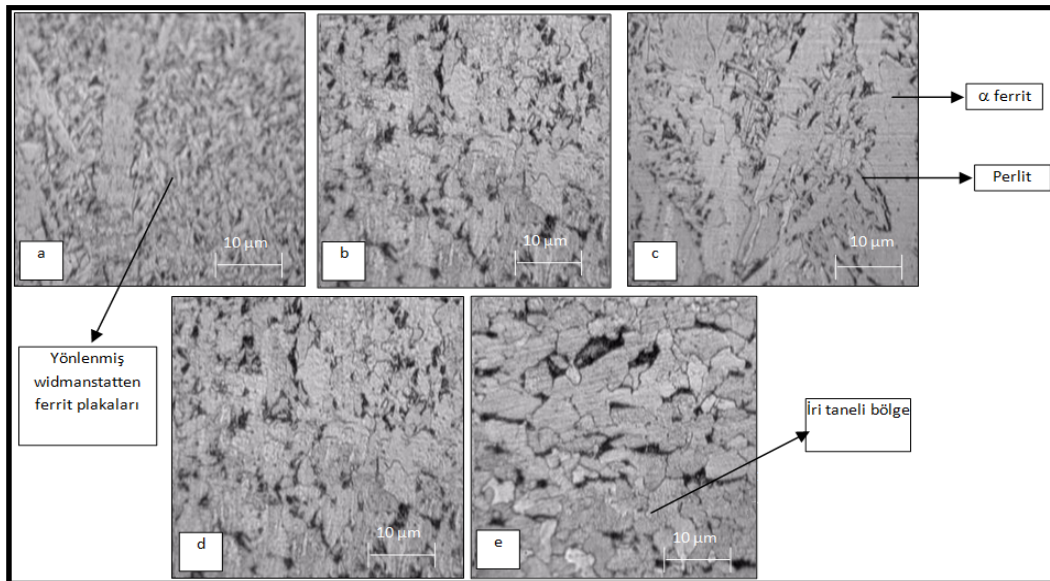
Şekil 2. X65 Doğalgaz Petrol Boru Numunesine (B) Ait Kaynak Metali Makroyapı Fotoğrafı (Macrostructure Image of Weld Metal of X65 Natural Gas Pipe Samples (B))

analizleri (Şekil 4 ve Şekil 5) ise bu durumu destekler niteliktedir. Bu durum yapıda bulunan V, Nb ve Ti gibi alaşım elementlerinin tane inceltici etkisinden kaynaklanmaktadır. Bazı düşük alaşımli çeliklere titanyum, vanadyum ve niyobyum gibi alaşım elementleri ilavesinin asiküler ferrit oluşumunu artırdığı bilinmektedir. Asiküler ferrit oluşumunun artmasıyla birlikte tane yapısı incelenerek, mekanik özellikleri arttırmaktadır [13]. Kaynak işleminde dolgu malzemesi seçiminde dikkate alınması gereken önemli husus kaynak metalinin akma ve çekme dayanımları ile tokluğunun artması ve yüksek performanslar elde edilmesidir. Kaynak metaline ilave edilen Mn, Cr, Ni, Mo, Ti, Nb ve V gibi alaşım elementleri mekanik özelliklerin

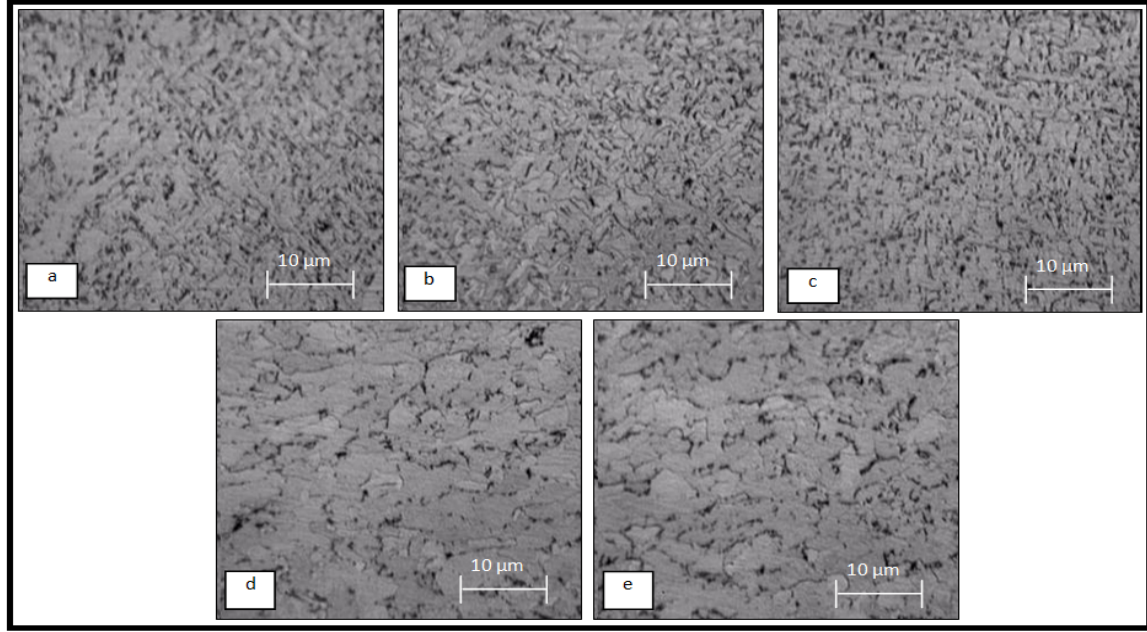


Şekil 3. Mikroyapı Fotoğrafları Çekilen Bölgelerin Şematik Gösterimi. a) İç ve Dış Kaynak Birleşim Noktası b) Dış Kaynak c) İç Kaynak d) Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) e) Ana Malzeme

(Schematic Illustration of the Weld Zones. a) Fusion Line of Internal and External Weld Zones b) External Weld c) Internal Weld d) Heat Affected Zone e) Main Material)



Şekil 4. X52 (A) numunesi Mikroyapı Fotoğrafları (x1000), a) İç ve Dış Kaynak Birleşim Noktası b) Dış Kaynak c) İç kaynak d) Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) e) Ana Malzeme (Microstructure Images of X52 Samples a) Fusion Line of Internal and External Weld Zones b) External Weld c) Internal Weld d) Heat Affected Zone e) Main Material)



Şekil 5. X65 (B) Numunesi Mikroyapı Fotoğrafları (x1000), a) İç ve Dış Kaynak Birleşim Noktası b) Dış Kaynak c) İç Kaynak d)Isının Tesiri Altındaki Bölge (ITAB) e)Ana Malzeme (Microstructure Images of X65 Samples a) Fusion Line of Internal and External Weld Zones b) External Weld c) Internal Weld d) Heat Affected Zone e) Main Material)

Şekil 4 ve Şekil 5’de verilen mikroyapı görüntülerine bakıldığında, her iki malzemede ITAB’da ana malzemeye göre daha iri tanelerin oluştuğu görülmektedir. Kaynak metalinde ise tane yapısı olarak, klasik kaynak metalindeki dendritik yapının hâkim olduğu belirgin bir şekilde görülebilmektedir. Tanelerin ısı akış yönüne ters yönde olacak şekilde oluştuğu görülürken, yüksek türbülansın etkisiyle tane yapısının diğer bölgelere oranla daha homojen bir şekilde ve daha ince olarak dağıldığı görülmektedir. Kaynak metal mikroyapısı daha ince tanelerden oluşmaktadır. Diğer bölgeler ise kısmen dendritik tanelerden oluşmuştur. X65 malzemenin birleştirilen petrol borusunun (B numunesi) kaynak metal mikroyapı fotoğraflarında uzun sütunsal ferrit plakaları görülürken, X52 malzemesine ait doğalgaz borusu (A numunesi) kaynak metalinde daha küçük ve sık ferrit plakaları görülmektedir. Petrol borusunun (X65), doğalgaz borusuna (X52) göre daha kalın kesitte olmasının, bu duruma sebep olduğu düşünülmektedir. Mikroyapı fotoğraflarında X52 malzemesinde daha iri ana malzeme tane yapısının oluştuğu görülürken, X65 malzemesinde daha küçük tanelerin oluştuğu görülmüştür. Bilindiği gibi ince taneli yapıların dayanımı kaba tanelere göre daha yüksektir. Çekme deney sonuçlarında da iri taneli yapıya sahip olan X52 malzemesinin çekme dayanımının, X65 malzemenin çekme dayanımından daha düşük bir değerde olduğu tespit edilmiştir. Diğer mekanik testlerde bu durumu doğrulamaktadır. Deneylerde kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimleri birbirine yakın olmakla birlikte karbon eşdeğerleri de aynıdır ($C_{eq}=\%0,26$). Üretim esnasında Ti, Nb gibi alaşım elementleri kullanarak tane inceltmesi sağlanarak malzemelerin dayanım değerleri artırılmıştır. Ti ve Nb

gibi alaşım elementleri tane sınırlarının çevresinde kümelenerek tanelerin irileşmemesi için bir bariyer görevi görmekte ve tanelerin ince ve küçük yapıda kalmasına neden olmaktadır. Deniz ve Krautkramer de yaptığı çalışmalarda [20, 21], V, Al, Mo, Ti ve Nb gibi elementlerin tane büyümesini azaltıcı etki yapan en önemli alaşım elementleri olduğunu ifade etmektedir.

3.3. Çekme Testi Sonuçları (Results of Tensile Test)

Deneyel çalışmada çekme numuneleri standarda (ASTM E8) uygun hazırlanan numunelere ait çekme test sonuçları Çizelge 5’de verilmektedir. Çekme deney sonuçları incelendiğinde, kopmanın bütün malzemelerde ana malzemenin olduğu, kaynaklı bölgeden herhangi bir kopmanın olmadığı tespit edilmiştir. Bu da kaynaklı numunenin çekme dayanımının, ana malzemenin çekme dayanımından yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi; çekme testi sırasında kaynaklı bölgenin deformasyonu engellemesi olarak düşünülmektedir. Kahraman ve arkadaşları yaptıkları çalışmada aynı bileşim ve farklı çekme boylarında yapılan çekme testleri sonucu, çekme hızı sabit ise çekme boyu kısa olan malzemenin hızlı pekleşmeden dolayı daha yüksek dayanım gösterdiğini belirtmektedir. Kaynak bölgesinin daha sert olması nedeniyle deformasyon bu bölgelerin dışında meydana gelmektedir. Deformasyonun dar bir bölgede meydana gelmesi ise dayanımın yüksek değerler göstermesine neden olmuştur. Kopma ana malzemenin olmasına rağmen, kaynaklı numunenin % uzama değerlerinin düşük çıkma sebebinin ise kaynaklı bölgenin çekme testi sırasında deformasyona uğramamasıdır. Kaynaklı bölgenin deformasyona karşı göstermiş olduğu direnç çekme mukavemetinin artmasına ve % uzama değerinin azalmasına neden olmaktadır [4]. Çekme test sonuçlarında X65 malzemesinden ölçülen çekme

değerleri kaynak metalinde ortalama 615 N/mm^2 , ana malzemede ise 564 N/mm^2 , X52 malzemesinde ise ana malzemede 515 N/mm^2 , kaynak metalinde ise 557 N/mm^2 olarak ölçülmüştür. Malzemelerin tane boyutlarının, mekanik özelliklerin tayininde önemli ölçüde etkili olduğu, çekme testlerinde de görülmektedir. Tane boyutu, mukavemeti belirleyen bir mekanizma olup, tane boyutu ile mukavemet arasında ters orantı vardır. Tane boyutu arttığında birleştirilen malzemenin mukavemet değerleri azalmakta, azaldığında ise mukavemet değerleri artmaktadır. Yapılan benzer çalışmalarda da; tanelerin ortalama büyüklüğü azaldıkça, tane boyutundan gelen akma dayanımının artacağı ifade edilmektedir [22, 23]. Deneylerde kullanılan farklı ilave tellerin özellikleri de kaynak metalinin mekanik özelliklerini etkilemektedir. İlave tellerin kimyasal kompozisyonları incelendiğinde, malzemelerin nispeten birbirine yakın içerikte olduğu görülmektedir. Ancak kaynak malzemeleri içerisinde, X65 malzemedeki Mn miktarı, X52 malzemesine göre % 50 oranında daha fazla içeriğe sahiptir (Çizelge 3). Mn oranının artması ile malzemenin mukavemet ve sertlik özellikleri artarken, tokluk değerinde azaldığı bilinmektedir. Yapılan bu çalışmada da kaynak metalinin mukavemet ve sertlik özellikleri artarken tokluk değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu özelliklerin sergilenmesinde, X65 malzeme kaynağında kullanılan S3Mo telin sahip olduğu mangan oranının etkili olduğu düşünülmektedir. C, Cu ve Mn gibi alaşım elementlerinin malzemenin mukavemet değerlerinin ve sertliği arttırdığı, kırılma ve tokluk değerlerinin ise azaldığı yapılan daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir [24, 25].

Çizelge 5. Çekme Testi Sonuçları (Results of Tensile Test)

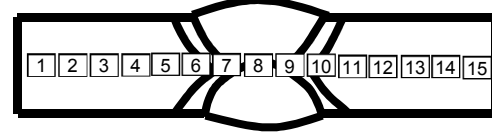
Numune	Ölçüm Bölgesi	Max. Çekme Dayanımı (N/mm^2)	% Uzama
A – X52 Doğalgaz Boru Numunesi	Ana malzeme	515 (± 7)	34 (± 3)
	Kaynaklı malzeme	557 (± 12)	20 (± 2)
B – X65 Petrol Boru Numunesi	Ana malzeme	564 (± 6)	36 (± 4)
	Kaynaklı malzeme	615 (± 8)	14 (± 2)

Çekme testi sonuçları, mikroyapı sonuçları ile birlikte irdelendiğinde; daha ince tane yapısı görülen X65 malzemede (Şekil 5) çekme dayanımı, alaşım elementleri ve tane yapısının etkisiyle birlikte daha yüksek sonuçlar göstermektedir. Düşük çekme dayanımı gösteren X52 malzemesinin (Şekil 4) mikroyapı fotoğraflarında ise; bu malzemenin daha kaba taneli yapıya sahip olduğu açıkça görülmektedir. Mahmutoğlu ve Çimenoğlu yaptığı çalışmada, API çeliğinin tane boyutunun küçüldükçe akma ve çekme mukavemeti ile sertliğinin artmakta, kopma uzamasında ise belirgin bir değişim görüldüğünü belirtmektedir [23]. Karacif ve arkadaşları da; küçük tane boyutuna sahip malzemelerin, yüksek dayanım, yüksek tokluk ve yüksek yorulma ömrü gibi avantajlara sahip olduğunu belirtmektedir [26]. Ayrıca, tane boyutu küçüldükçe akma ve çekme mukavemeti, çentik darbe ve kırılma tokluğu ile sertlik değerlerinin arttığı ifade edilmektedir. Akma ve çekme mukavemetindeki artış,

tane boyutunun küçülmesi sonucunda tane sınırlarının yoğunluğunun artarak dislokasyon hareketlerini engellemesinden kaynaklanmaktadır [27].

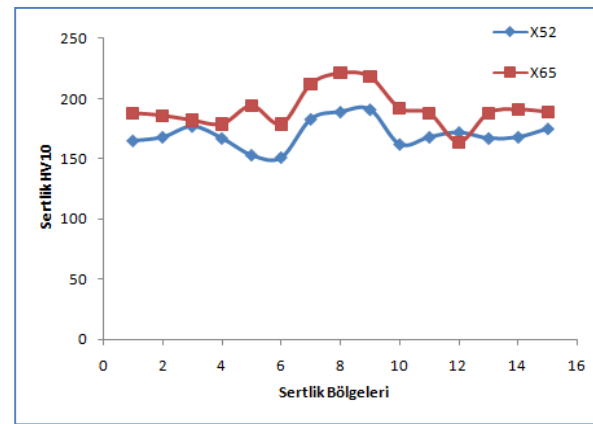
3.4. Sertlik Testi Sonuçları (Results of Hardness Test)

Şekil 6'da sertlik değerleri alınan bölgelerin şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 6. Sertlik ölçüm bölgeleri (The Regions of Hardness measurement)

X52 ve X65 malzemenin sertlik grafiği ise Şekil 7'de verilmektedir.



Şekil 7. X52 ve X65 malzemelerine ait sertlik grafiği (Hardness graph of X52 and X65 materials)

Sertlik grafiğinde en yüksek sertliğin kaynak bölgesinde olduğu, en düşük sertliğin ise kaynak metalinin hemen yanında ısının tesiri altındaki bölgede (ITAB) olduğu görülmektedir. Eroğlu ve Aksoy'un, yaptıkları çalışmada en yüksek sertlik değerlerinin kaynak metalinde olduğunu ifade etmesi, çalışmadaki sertlik sonuçlarını destekler niteliktedir [28]. X52 malzemede kaynak metalinin sertliğinin yaklaşık 190 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise malzemenin orijinal sertlik değeri olan yaklaşık 170 HV olduğu görülmektedir. X 65 malzeme için kaynak metali sertliğinin yaklaşık 220 HV olduğu, ana malzeme sertliğinin ise ilk sertlik değeri olan yaklaşık 180 HV değerinde olduğu görülmektedir (Şekil 7).

3.5. Çentik - Darbe Deneysel Sonuçları (Results of

Charpy – Impact Test)

-20 °C’de gerçekleşen çentik - darbe deneyleri sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6’da verilmiştir. Çentik - darbe deney sonuçlarına göre X 52 malzemede ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 182 Joule, kaynak metalinin ise 148 Joule olduğu tespit edilmiştir. X 65 malzemede ise ana malzemenin ortalama çentik - darbe değerinin 299 Joule, kaynak metalinin ise 65 Joule olduğu görülmektedir.

Çizelge 6. Çentik darbe test sonuçları (Results of Charpy Impact Test)

Numune	Ölçüm Bölgesi	Enerji (Joule) Test sıcaklığı:-20°C
A – X52 Doğalgaz Boru Numunesi	Ana malzeme	182 (±7)
	Kaynaklı bölge	148 (±8)
B – X65 Petrol Boru Numunesi	Ana malzeme	299 (±11)
	Kaynaklı bölge	65 (±5)

Çentik – darbe deneylerinde, kaynaklı bölgelerdeki çentik – darbe değerlerinin daha düşük olduğu, ana malzeme değerlerinin ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik deney sonuçlarında da en sert bölgenin kaynak metali olduğu belirtilmiştir. Elde edilen çentik - darbe deney sonuçları sertlik sonuçları ile kıyaslandığında sertliğin yüksek olduğu bölgelerin kırılma enerjisinin daha yüksek olduğu, buna karşın ana malzemelerin kaynak bölgelere oranla daha tok olduğu ve kırılma enerjisini daha çok absorbe ettiği görülmektedir. Kaynak metali içerisinde tane sınırı widmanstatten ferrit ve martenzit oluşumunun tokluk düşüşüne neden olduğu bilinmektedir. Eroğlu ve Aksoy da yaptıkları çalışmada, yine tane sınırı widmanstatten ferrit ve martenzit yapının kaynak metalinde tokluk düşüşüne neden olduğu ifade edilmektedir [28]. İnce tane yapısının hâkim olduğu X65 malzemenin kaynak metalinde daha yüksek sertlik değerleri görülürken, en düşük çentik darbe değerleri, sertliğe ters oranlı olarak X65 malzemede görülmektedir. Sertlik deneylerinden elde edilen verilerden de görüleceği üzere kaynak bölgesi malzemenin en sert bölgesidir. Kaynak metalleri için ölçülen sertlik grafiklerinde verilen değerler ile tokluk değerleri kıyaslanacak olursa; sertlik arttığında tokluğun azaldığı görülmektedir.

Tane boyutunun tokluk üzerine etkilerini incelemek üzere yapılan çalışmalarda, kaba taneli yapılar ile ince taneli yapılar mukayese edilmiş ve kaba taneli yapılardaki tokluk değerlerinin, daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [29]. Ayrıca çeliklerin mekanik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda, artan tane boyutunun etkisiyle akma ve çekme dayanımları artarken, tokluk dayanımlarının düştüğü belirtilmektedir [30, 31].

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Çalışmada kullanılan malzemelerden X52’de daha iri tane yapısı oluşurken, X65’in daha ince tanelerden meydana geldiği görülmüştür.
- İnceltmiş tane yapısına sahip olan malzemelerin çekme dayanımı ve tokluk gibi mekanik özelliklerini arttırdığı ve X65 malzemesinin sahip olduğu mekanik özelliklerin, X52 malzemesine oranla daha iyi sonuçlar sergilediği görülmüştür.
- Üretim esnasında Ti, Nb, V gibi alaşım elementleri kullanarak tane inceltmesi yapılmış ve malzemelerin dayanımının artırıldığı, Ti, Nb ve V gibi alaşım elementleri tanelerin ince kalmasını sağlayarak mukavemetlendirme mekanizmasına neden olduğu gözlenmiştir.
- Mikroyapı ile elde edilen çekme dayanımları sonuçlarının birbirleri ile uyumlu olduğu ve daha ince tane yapıları X65 malzemenin, kaba taneli X52 malzemesinden daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.
- Mikroyapıda bulunan widmanstatten ferrit, asiküler ferrit ve martenzit fazların kaynak metalinde sertliği arttırdığı, tokluğu ise olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] TPAO, “Petrol ve Doğalgaz Sektör Raporu”, *Türkiye Petrolleri Anonim Ortaklığı*, Ankara, 1-2, (2008)
- [2] Petrogas, “Dünya daha çok enerji istiyor”, *Petrogas, Botaş Vakfı Yayın Organı Sayı 10*, Ankara, 30-31, (1999).
- [3] Durgutlu A., Kahraman N., Gülenç B., “Tozaltı ark kaynağında kaynak tozunun mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi”, *ESEF*, 10(11):1-8, (2002).
- [4] Kahraman N., Gülenç B., Durgutlu A., “Tozaltı ark kaynağı ile kaynaklanan düşük karbonlu çeliklerde serbest tel uzunluğunun mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkisinin araştırılması”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 18(3): 473-480 (2005).
- [5] Kaya Y., Kahraman N., Durgutlu A., Gülenç B., “Tozaltı ark kaynağı ile birleştirilen farklı kalınlıktaki Grade A gemi saclarının mekanik özelliklerinin araştırılması”, *J. New World Sci. Acad. Eng. Sci.*, 1A0088, 5(2): 348-357, (2010).
- [6] Kahraman N., Gülenç B., “Modern Kaynak Teknolojisi Kitabı”, *Epa-Mat Basın Yayın Ltd. Şti*, Ankara, 30-36, (2009).
- [7] Ogborn J.S., “Submerged Arc Welding”, *ASM Handbook*, 6: 202-204, (1993).
- [8] Çetinkaya C., “Orta karbonlu çeliklerin tozaltı ark kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliği ve mekanik özelliklerin incelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 1(3-4): 61 - 67, (1998).
- [9] Yıldız M., “Doğalgaz boru hatlarının kaynağı ve tahribatsız muayenesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4 - 12, (2000).

- [10] Bajic N. and Šijaki-Žeravi V., “The analysis of change of structural and mechanical properties of welded joints of microalloyed Nb/V steel grade by changing the composition of filler material,” *Internat. Conf. on Welding*, Belgrade (2003).
- [11] Bajic N., Šijaki-Žeravi V., Rakin M. and Kovacevic K., “Structure optimization of weld metal and HAZ in microalloyed high strength steel welded joints”, *YUCOMAT 2005*, Herceg Novi, (SBN: 86-80321-08-7), pp. 193–200, (2005).
- [12] Radovic A., Bajic N. and Grabulov V., “Specific quality of the weld metal of welded joints of fine-grained microalloyed steels”, *Zavarivanje* 96, 61–72, Belgrade, (1996).
- [13] Beidokthi B., Koukabi A.H., Dolati A., “Effect of Titanium Addition On The Microstructure And Inclusion Formation In Submerged Arc Welded HSLA Pipeline Steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 1-9, (2009).
- [14] Osama A.K., “Weld metallurgical aspects and crack susceptibility in high-strength steels: weldability of materials and testing methods”, *Vranje*, 49–57, (1985).
- [15] Bhadeshija H.K.D., “Bainite in Steels”, *The Institute of Materials*, London, UK, 45–58. (1992).
- [16] Li Y., Crowther D.N., Green M.J.W., and Mitchell P.S., “The effect of vanadium and niobium on the properties and microstructure of the intercritically reheated coarsegrained heat-affected zone in low-carbon microalloyed steels”, *ISIJ International*, 41: 46 – 61, (2001).
- [17] Evans G.M., “The effect of alloying elements on the microstructure and properties of ferrite all-weld-metal deposits”, *Welding-90*, Zurich, Switzerland, (1990).
- [18] Evans G.M., “The effect of nickel on the properties of C-Mn as-welded metal deposits”, (I.I.W2-1A-791-89), (1989).
- [19] Hallen G., “Some aspects on the formation of microstructure in multipass welds in ferritic ductile iron”, *3rd Int. Symp. on the Physical Metallurgy of Cast Irons*, Stockholm, Sweden, 457–65, (1984).
- [20] Krautkramer M.B., “Nondestructive Material Testing with Ultrasonics - Introduction to the Basic Principles”, *The e-Journal of Nondestructive Testing & Ultrasonics*, ISSN: 1435-4934, 5:9, (2000).
- [21] Deniz A., “Çeliklerde Tane Boyutunun Ultrasonik Yöntemle İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 40, Ağustos, (2012).
- [22] Kara R., “Tane Boyutunun HMK Kafesli Metallerin Temel Mekanik Özelliklerine Etkisi”, Yüksek lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2005).
- [23] Mahmutoğlu Z., Çimenoğlu M., “% 0.03 Nb ve % 0.05 V’lu Bir Boru Hattı Çeliğinde Mikroyapı-Mekanik Özellik İlişkisi”, *İTÜ Dergisi – Mühendislik*, 2(6): 1-5, (2003).
- [24] Ada H., Fındık T., Çetinkaya C., “Petrol ve Doğalgaz Boru Hatları İçin Üretilen Boruların Birleştirilmesinde Kaynak Teli Kompozisyonunun Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, *2nd International Conference on Welding Technologies and Exhibition*, Ankara, 654-664, (2012).
- [25] Ünlü B.S., Kurgan N. ve Yılmaz S.S., “Toz Metal Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, *Mühendis ve Makina*, 50: 1-9, (2008).
- [26] Karacif K. ve İnem B., “Düşük Karbonlu Bir Çeliğin Kaynağında Termomekanik İşlemin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 16: 1-8, Ankara, (2001).
- [27] Taş Z., “Nb ve V Alaşımli Çeliklerinde Mikroyapı - Mekanik Özellikler İlişkisi”, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 22: 1-9, Kayseri, (2006).
- [28] Eroğlu M. ve Aksoy M., “15Mo3 Çeliğinin Kaynağında Enerji Girişinin Kaynak Bölgesinin Mikroyapısı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi”, *Kaynak Teknolojisi 2. Ulusal Kongresi*, 38, (2002).
- [29] Kostrubanic J., Koss D.A., Locci I.E. and Nathal M., “On Improving the Fracture Toughness of a Ni-Al Based Alloy by Mechanical Alloying”, *MRS Fall Meeting*, (1990).
- [30] Xiao F.R., Liao B., Shan Y.Y., Qiao G.Y., Zhong Y., Zhang C., Yang K., “Challenge of Mechanical Properties of An Acicular Ferrite Pipeline Steel” *Materials Science and Engineering A*, 431: 41–52, (2006).
- [31] Zhao M.C., Yang K., Shan Y. “The Effects Of Thermo-Mechanical Control Process On Microstructures And Mechanical Properties Of A Commercial Pipeline Steel”, *Materials Science and Engineering A*, 335: 14–20, (2002).

Kitosan-Kil Biyonanokompozitleri

Nevin ÇANKAYA, Özlem SÖKMEN

Uşak Üniversitesi, Fen –Edebiyat Fakültesi, Kimya Bölümü, UŞAK

(Geliş / Received : 20.10.2015 ; Kabul / Accepted : 08.12.2015)

ÖZ

Doğada bulunan kaynaklardan bol miktarda elde edilebilen kitosan, canlılara karşı toksik özelliğinin olmaması, biyolojik olarak parçalanabilirliği, biyoyumluluğu, kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından diğer biyopolimerlere göre üstün özellikler göstermesi nedeniyle birçok endüstri dalı için uygun bir maddedir. Doğal bir biyopolimer olan kitosan, başta gıda, kozmetik, ziraat, tıp, kâğıt ve tekstil olmak üzere birçok endüstri dalında kullanım alanı bulmuştur. Nanoparçacıkların biyobozunur polimerlerle modifiye edilerek güçlendirilmesiyle tamamen farklı özelliklerde yeni malzemeler geliştirilmekte ve bazı materyallerin olumsuz özellikleri iyileştirilebilmektedir. Bu çalışmada biyobozunur ve toksik özelliği olmayan, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, doğada bol bulunan çevre dostu kitosan biyopolimeri ile organokil haline dönüştürülen sodyum montmorillonit (Na^+MMT) tipi killerden, biyonanokompozit hazırlama teknikleri incelenmiştir. Farklı spektroskopik yöntemlerle karakterize edilen bu biyonanokompozitlerin hedeflenen uygulama alanlarına yönelik özellikleri incelenmiş, ayrıntılarıyla bilgi verilmiş ve şimdiki kadar yapılmış olan çalışmalar irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler : Kitosan, Na-Montmorillonit (Na^+MMT), Organokil, Biyopolimer-Kil Nanokompozit, Biyonanokompozit.

Chitosan-Clay Bionanocomposites

ABSTRACT

Chitosan, which could be obtained abundantly from natural sources, is a suitable material for many applications in food, cosmetics agriculture, medical, paper and textile industries since it non-toxic, biodegradable, biocompatible, and superior to other biopolymers because of its chemical and physical properties. Modifying nanoparticles with biodegradable polymers yield to new and reinforced materials with drastically different properties while some inappropriate properties could be improved. This study investigates bionanocomposite preparing methods from biodegradable, non-toxic, abundant and obtained-from-edible-sources chitosan and sodium montmorillonite type clays (Na^+MMT), which has been transformed into organoclay. These bionanocomposites have been characterized by various spectroscopic characterization methods for targeted applications, and detailed information as well as existing studies has been provided.

Keywords : Chitosan, Na-Montmorillonite (Na^+MMT), Organoclays, Biopolymer-Clay Nanocomposites, Bionanocomposites.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Biyopolimerlerin yenilenebilir, ayrışabilir olmaları, doğada bol miktarda bulunmaları ve düşük maliyetle elde edilmeleri en büyük avantajlarından [1]. Son yıllarda çevre kirliliği ve küresel ısınmadan dolayı, petrokimyasal polimerlerden farklı olarak çevreye minimum zararı bulunan çevre dostu biyopolimerler üzerinde çalışılmakta ve bu konu geliştirilmektedir [2]. Biyopolimerler, biyolojik çevrelerde (deniz, toprak, nehir, göl, insan ve hayvan bedeni) hem enzimatik hem de enzimatik olmayan yollarla parçalanabilir [3]. Doğal polimerlerin yararları ve uygulama alanları aşağıda verilmiştir [4,5].

Doğal Biyopolimerlerin Yararları

- Yenilenebilir.
- Biyobozunur.
- Besleyici özellikteki gıdaları tamamlayıcı.

- Gıdaların görünüş, koku ve aroma gibi organoleptik özelliklerini zenginleştirme.
- Düşük maliyetli ve bolca bulunabilme.
- Genellikle paketlenmeyen ürünlerde uzun raf ömrü ve iyi kalite sağlama.
- Ambalaj hacmini, ağırlığını ve atığını azaltma.
- Yıllık yenilenebilir kaynaklar.

Uygulama Alanları

- Yenmez filmlerle beraber çok katmanlı gıda kaplama materyali olarak kullanılabilir.
- Antimikrobiyal ajan ve antioksidanlarla birlikte aktif yapı oluşturabilir.
- Mikroinkapsülasyon ve gıda bileşenlerinin kontrollü salınımı gerçekleştirilebilir.
- Kuru üzüm ve fındık gibi küçük partiküllü gıdaların özel olarak paketlenmesi yapılabilir. Nem, gaz, lipit ve çözünen maddelerin migrasyonu kontrol edilebilir

Biyobozunur polimerlerin (biyopolimer) büyük miktarı organizmaların büyüme döngüleri sırasında kimyasal veya biyolojik olarak sentezlenmektedir. Biyopolimerler

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

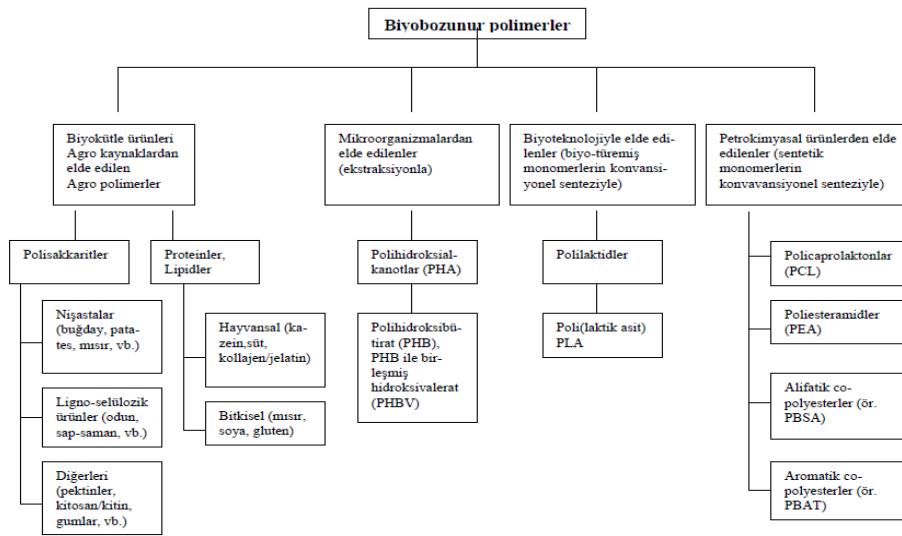
e-posta: nevin.cankaya@usak.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 283-295

sentezlerine bağlı olarak dört farklı kategoride sınıflandırılmıştır.

- Tarımsal kaynaklı biyokütlerden elde edilen polimerler, (Nişasta, selüloz)
- Mikrobiyal üretimden elde edilen polimerler, (Polihidroksialkanoatlar)
- Tarımsal kaynaklardan elde edilen monomerler kullanılarak kimyasal olarak sentezlenen polimerler, (Polilaktik asit)
- Hem monomerleri hem de polimerleri fosil kaynakların kimyasal sentezinden elde edilen polimerlerdir.

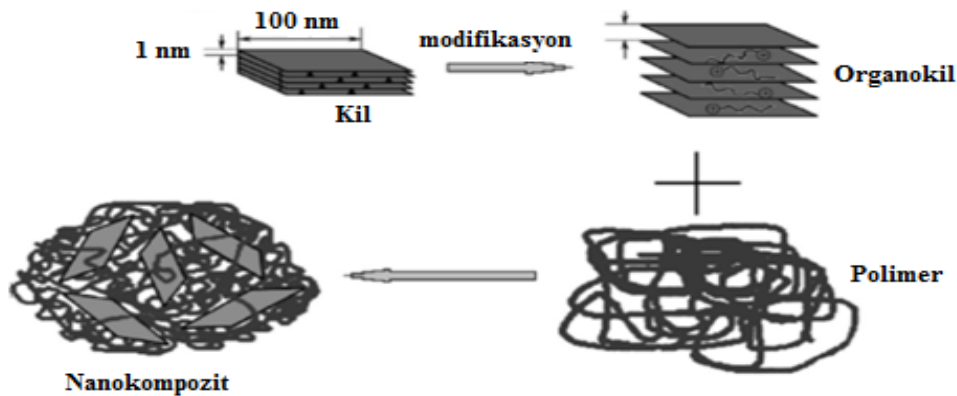
Biyobozunur polimerlerin sentezlerine bağlı olarak sınıflandırılması Şekil 1’de verilmiştir [6].



Şekil 1. Biyobozunur polimerlerin sentezlerine bağlı olarak sınıflandırılması (The classification by synthesis of biodegradable polymers)

Doğal bir polimer olan kitosan, kil ile muamele edilerek kitosan/kil nanokompozitler oluşturulmuştur. Elde edilen sonuçlar neticesinde kitosan biyopolimerinin özellikleri-

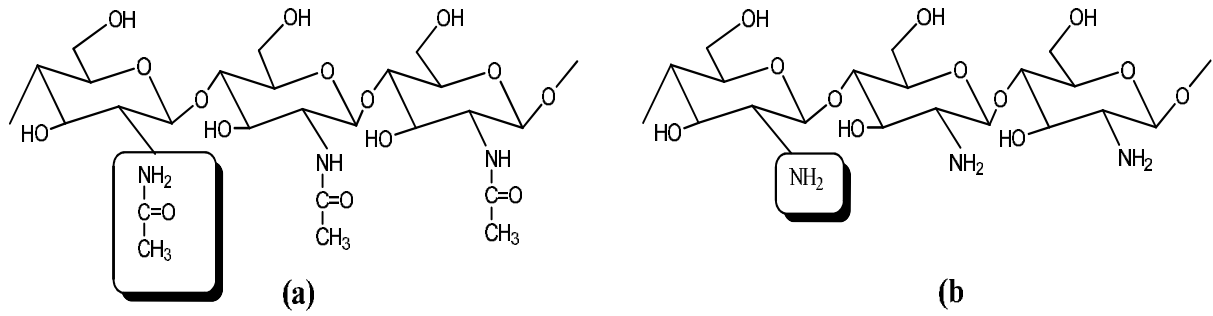
(glukozamin) monomerlerinin birbirine β -1,4 bağlarıyla bağlandığı, reaktif fonksiyonel amino ve hidroksil gruplarına sahip, kimyasal yapı olarak selüloza benzeyen ve doğada selülozdan sonra en sık rastlanan



Şekil 2. Polimer/kil nanokompozitlerin sentezi (The synthesis of polymer/clay nanocomposites)

nin nano ölçekte kil partikülleri tarafından değiştirilebileceği, kullanım alanlarının geliştirilebileceği tespit

biyopolimerdir [9, 10]. Kristal ve yarı kristal formlarda bulunan kitosan, polikationik özellik gösteren lineer



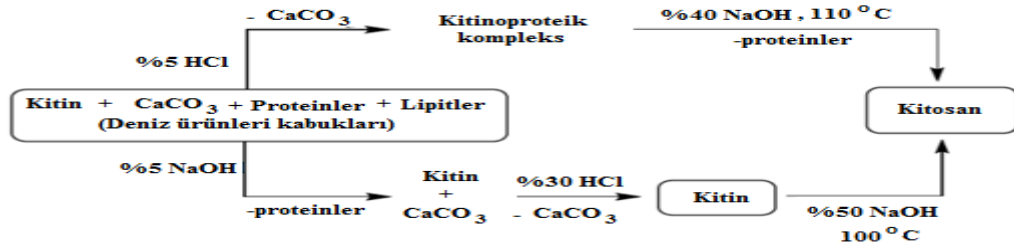
Şekil 3. Kitin (a), kitosanın (b) kimyasal yapısı (The chemical structures of chitin (a), chitosan (b))

yapılı bir polimerdir. Özel yapılarından dolayı biyoyenilenebilir, biyobozunabilir ve biyofonksiyonel gibi yüksek biyolojik ve mekaniksel özelliklere sahip olan kitosan biyopolimerleri, araştırmacıların ilgisini çekmiştir [11].

Kitosan, serbest amino gruplarına sahip olduğundan sulu asidik ortamlarda çözünen bir biyopolimerdir. Bu çözünme kitosanın C-2 pozisyonunda bulunan NH_2 gruplarının protonlanması sonucu polielektrolite dönüşmesiyle gerçekleşir. Yüksek yük yoğunluğuna sahip olan kitosan bir çok metal iyonu ile kompleks oluşturabilir [12]. Kitosan bu özelliği ile boyaları, aromatik hidrokarbonları ve proteinleri adsorplayabilir. Kitosan özellikle serbest amino grupları üzerinden metalle kompleks oluşturarak metal adsorpsiyonunda ve atık su arıtım uygulamalarında aktif çamurun susuzlaştırılmasında kullanılmaktadır. Biyobozunur ve

çözündüğünde yüksek yük yoğunluğuna sahip katyonik polimerler oluşturmaktadır. Bu özelliğinden dolayı kitosan birçok anyonik polimerlerle polielektrolit kompleksler oluşturmaktadır. Kitosanın bu özelliği, yara dokusunun iyileşmesine, DNA ile kompleksler oluşturabilme özelliğinden dolayı da viral olmayan gen taşıma araçları olarak kullanılmaktadır [16].

Farklı deasetilasyon, polimerizasyon ve molekül ağırlığı derecelerinde; kitin, kitosan ve bunların oligomerlerinin hazırlanması için kimyasal ve enzimatik olmak üzere iki farklı yöntem vardır. Kitin, kitosan ve bunların oligomerleri konsantre asit uygulaması ile üretildikten sonra, kolon kromatografik yöntemi ile fraksiyonlarına ayrılırlar. Aynı zamanda kitin ve kitosan oligomerleri mikrobiyolojik ve fungal uygulamalarla (enzimatik hidrolizler) da hazırlanabilir [17]. Şekil 4'te kitinden kitosan eldesi ve kitinin izolasyonu ifade edilmiştir.



Şekil 4. Kitinin izolasyonu ve kitinden kitosan elde edilmesi (The isolation of chitin and synthesis of chitosan from chitin)

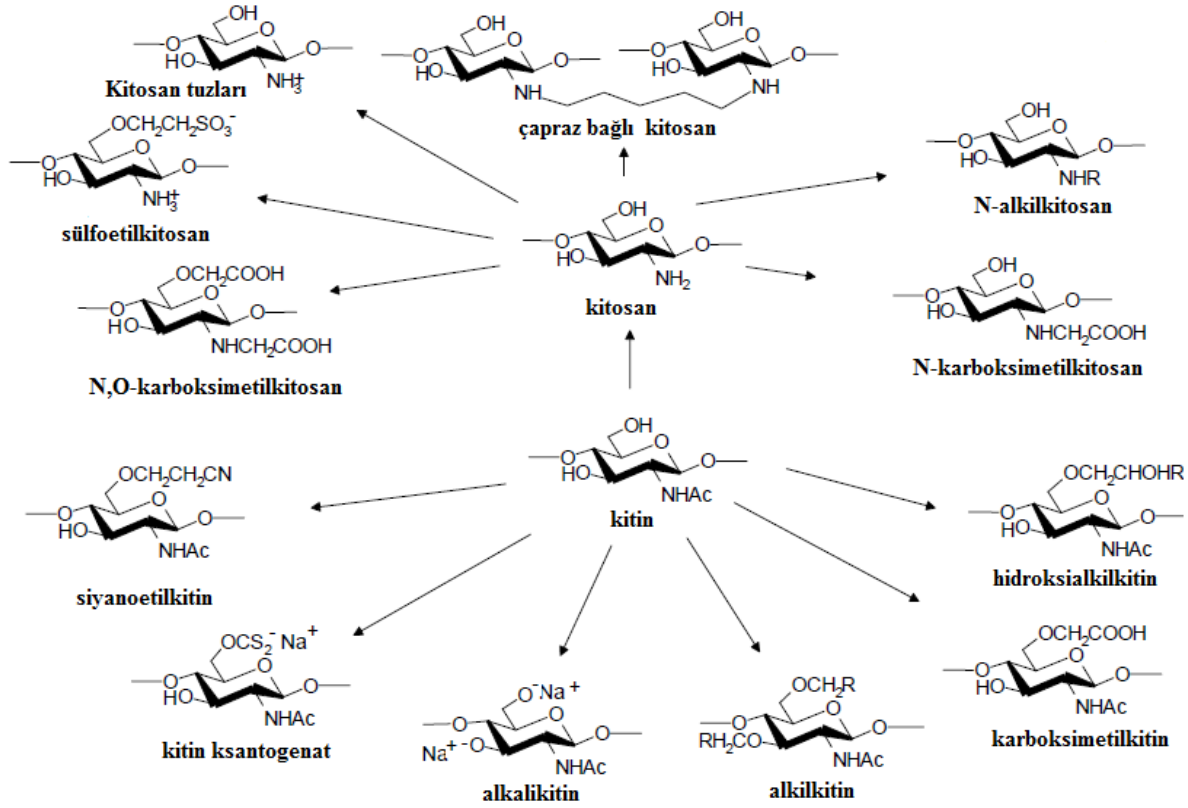
daha az toksik olduğu için çevre korunmasında sentetik polimerlere göre daha çok tercih edilmektedir [13, 14].

Herhangi bir toksisitesinin bulunmaması, alerji ve irritasyon yapıcı olmamasının yanı sıra, biyoparçalanabilir ve biyogeçimli oluşu farmasetik ve medikal alanda kitosanı önemli ve ilgi çekici bir biyomateriyal yapmaktadır. Kitosan, hemostatik, bakteriyostatik, fungusatetik, antikanserojen, yara ve kemik iyileşmesini hızlandırıcı gibi biyoaktif özelliklere sahiptir. Kitosan bu özelliklerinden bazıları ile beşeri ilaçların yanı sıra veteriner alanında da kullanım yeri bulmuştur [15]. Ayrıca kitosan ve polimeri kullanılarak elde edilen komplekslerin yara örtü malzemesi, ilaç dağıtım sistemleri gibi biyomedikal uygulamalarda kullanılmasına olanak sağlamıştır. Kitosan zayıf asitlerle

Deasetilasyon derecesi; deasetilasyona uğramış N-asetil-D-glukozamin ünitelerinin sayısının toplam ünite sayısına göre miktarını gösterir. Kitosanın fizikokimyasal özellikleri, deasetilasyon derecesi ve molekül ağırlığı ile değişmektedir [18]. Ortalama molekül ağırlığı 3.200-2.000.000 g/mol arasındadır [12]. Çoklu nükleofilik yapıya sahip olmasından dolayı, organik reaksiyonlara yatkındır. Kitosan primer amin ve primer-sekonder hidroksil grupların reaktivitesi nedeniyle kolayca türevlendirilebilmektedir. N-alkil kitosan, N-karboksi alkil (aril) kitosan, şeker türevleri ve metal iyon şelatları kitosan türevlerinden bazılarıdır. Kitosanın enzimatik ya da kimyasal hidrolizi ve radyasyon depolimerizasyon yöntemi ile oligomerleri

hazırlanabilmektedir [19, 20]. Şekil 5'te kitin-kitosan türevleri gösterilmiştir.

kalan 2 µm çapından küçük taneler içeren malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Kimyasal analizler sonucunda

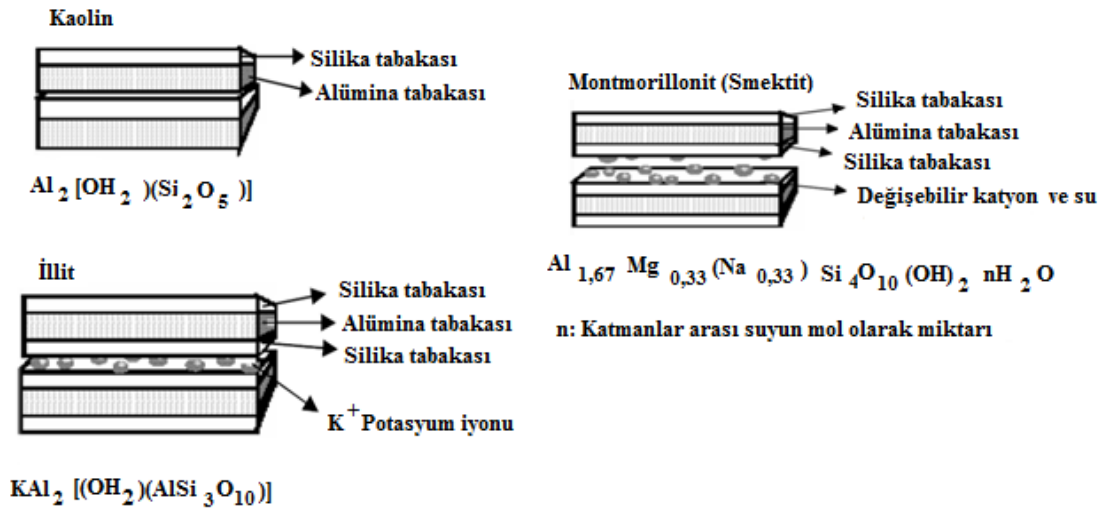


Şekil 5. Kitin ve kitosanın türevleri (The derivatives of chitin and chitosan)

1.2. Kil Mineralleri ve Organokiller (Clay Minerals and Organoclays)

Kil doğal, küçük parçacık boyutuna sahip su ile etkileşime girdiğinde plastik özellik kazanan malzemelere verilen genel bir isimdir. Parçacık boyutu olarak killer, mikroskopla tanımlama sınırları dışında

kil minerallerinin yapılarında ağırlıklı olarak silika, alüminyum, su belirli miktarlarda alkali ve toprak alkali metalleri bulunduğu tespit edilmiştir. Fakat tüm kil mineralleri aynı özellikleri göstermemektedir [21]. Kil mineralleri su moleküllerini adsorpladıkça ya da diğer polar (Na^+ , K^+ , Ca^{+2} ve organik bileşikler vb.) iyonları yapısına aldıkça hacmi değişir. Bu durum kilin şişme



Şekil 6. Bazı kil türleri (Some clay types)

özelliği olarak tanımlanır. Kil tabakaları arasında bulunan boşluklara galeri denir. Bu galerilerde Van der Waals kuvvetleri etkilidir. Tabakalar genelde negatif yüklü olduğundan, galerilerde pozitif yüklü iyonlar (katyon) bulunur [22]. Şekil 6’da bazı kil türleri ve tabakalı yapıları gösterilmektedir.

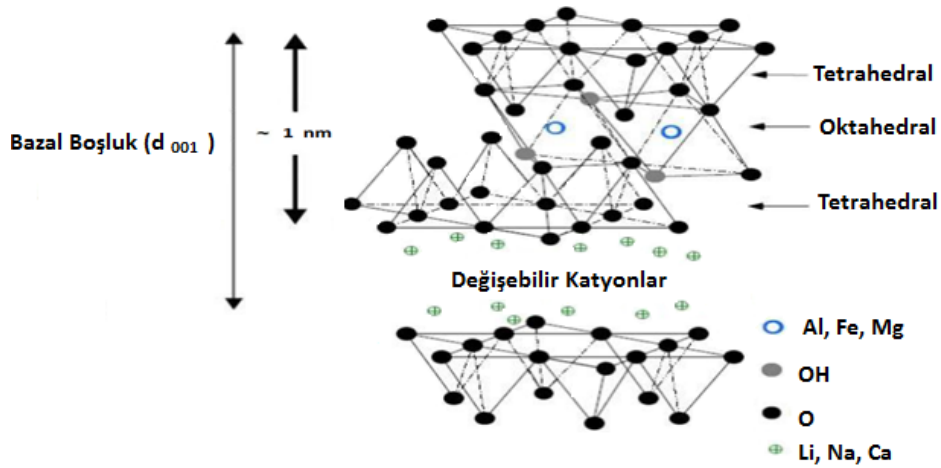
Montmorillonitler, üç (2:1) tabakalı, iki tetrahedral (T) tabakanın arasına bir oktahedral (O) tabakanın girmesi sonucu, birim hücre (TOT) olarak tanımlanan yapıların yüzlercesinin bir araya gelmesiyle oluşan smektit grubu bir kil türüdür. Oktahedral birimlerin diğer oktahedral birimler ile bir araya gelmesi durumunda alümina

Çizelge 1. Kil türlerinin sınıflandırılması (Classification of clays)

Tabaka Yapısı	Tabaka Cinsi	Şişme Özelliği	Kil Çeşitleri
1 : 1	Si : Al	Yok	Kaolin Grubu (Kaolinit, Hallosit, Diksit)
2 : 1	Si : Al : Si	Yok	İllit Grubu
2 : 1	Si : Al : Si	Var	Smektit Grubu (Montmorillonit, Biedelit, Nontronit)
2 : 2	Si : Al : Si : Al	Yok	Klorit
Lifli Yapılı Kil Mineralleri			Poligorskit, Sepiyonit

Killer ucuz olduğundan, kolay temin edildiğinden ve özellikle çevreye duyarlı bir materyal olmasından dolayı kitosan nanokompozitlerin sentezinde kullanılmaktadır [23]. Tüm kil mineralleri silikaca zengindirler bununla birlikte kil tabakaları arasında Ca^{+2} , Fe^{+2} , Na^+ , Mg^{+2} veya Al^{+3} gibi iyonlar bulunur ve bu iyonlar kilin özelliğini etkiler. Killer adsorplama kapasitelerine göre şişen ve şişmeyen killer olarak iki grupta incelenirken, tabakalar

tabakaları oluşur. Silika ve alümina tabakaları arasında kuvvetli bir iyonik bağ olmasına karşın birim tabakalar birbirine zayıf Van der Waals kuvvetleri ile bağlanmıştır. Tabakalar arasında ise su molekülü ve pozitif yük noksanlığını karşılayan değişebilir katyonlar bulunmaktadır. Su ve organik moleküller bu birim tabakalar arasına girerek yapının genişlemesine neden olurlar [27].



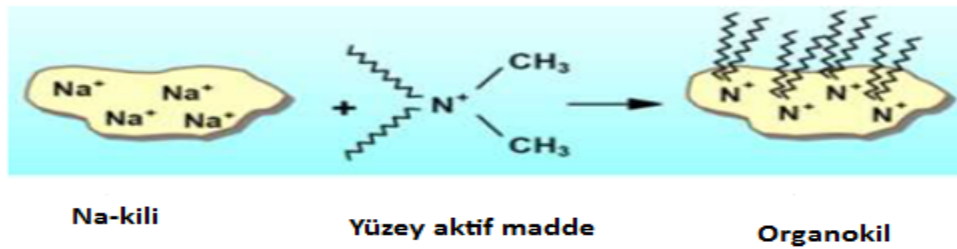
Şekil 7. Montmorillonit kilinin kristal yapısı (The crystal structure of montmorillonite clay)

arası mesafe ve kristal yapıları da killerin sınıflandırılmasın önemli rol oynamaktadır [24]. Çizelge 2’de killerin sınıflandırılması gösterilmektedir.

Montmorillonit, adını Fransa’nın “Montmorillon” bölgesinden almış ve 1896’da Knight tarafından “montmorillonit” olarak isimlendirilen smektit türü bir kildir. Genel formülü $[Al_{1,67}Mg_{0,33}(Na_{0,33}) Si_4O_{10}(OH)_2.nH_2O]$ şeklinde olan montmorillonit, daha çok alkali ve toprak alkali metal tuzlarından meydana gelir. Beyaz, kahverengi ve yeşilimsi sarı renklerde bulunabilen, kristal yapısı monoklinik-prizmatiktir ve ortalama yoğunluğu $2,35 \text{ gr/cm}^3$ ’tür. Su içerisinde diğer minerallerden daha çok şişen Montmorillonitin su emme özelliğinden dolayı hacmi artar ve plastisitesi de yükselir [25]. Montmorillonit kolay elde edilmesi, yüksek yüzey alanı ve yüksek yüzey reaktifliği nedeniyle polimer nanokompozitler için kullanıma en uygun kildir [26].

Kil minerallerinin tabakaları arasında Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ gibi inorganik katyonlara, değişebilir katyonlar denir. Montmorillonit mineralinin ve diğer kil minerallerinin 100 gramında bulunan değişebilir inorganik katyonların mili eşdeğer molar kütle sayısına ise *Katyon Değişim Kapasitesi* denmektedir [23]. Kil galerilerindeki mevcut katyonlar, katyon değişim tepkimesi ile değiştirilebilir. Katyon değişim kapasitesi; sulu bir çözelti içinde, katyon değişim kapasitesine denk gelen kil minarelinin tabakalar arasındaki katyonun, katyonik surfaktanlarla değişimidir. Çok sayıda katyonik modifiye edilmiş montmorillonitler ticari olarak kolaylıkla temin edilebilmektedir [28, 29]. Ogawa ve arkadaşları kil minerallerini, amonyum mineralleri ile ilk kez katyon değişimini gerçekleştirmişlerdir [30].

Organokiller; kil minerallerinin içindeki değişebilen katyonların alkilamonyum, dialkilamonyum ya da kuaterner amonyum katyonları ile yer değiştirmesinden oluşmaktadır. Alkilamonyum, dialkilamonyum yanında daha çok kuaterner amonyum katyonları organokil oluşturmakta kullanılmaktadır. Organokillerin hazırlanmasında kullanılan organik katyonların büyüklüğü ve kilin tabakaları arasındaki moleküler diziliş şekline göre organokilin adsorplama özellikleri değişmektedir. Kil katmanları arasına giren alkilamonyum, dialkilamonyum ya da dördü amonyum katyonlarının yönelme şekilleri katyonun büyüklüğüne, yani alkil zincir uzunluğuna ve mineralin yük yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 8’de kil türü Na-Montmorillonit (Na^+MMT) ile organokil sentezi gösterilmiştir [31].



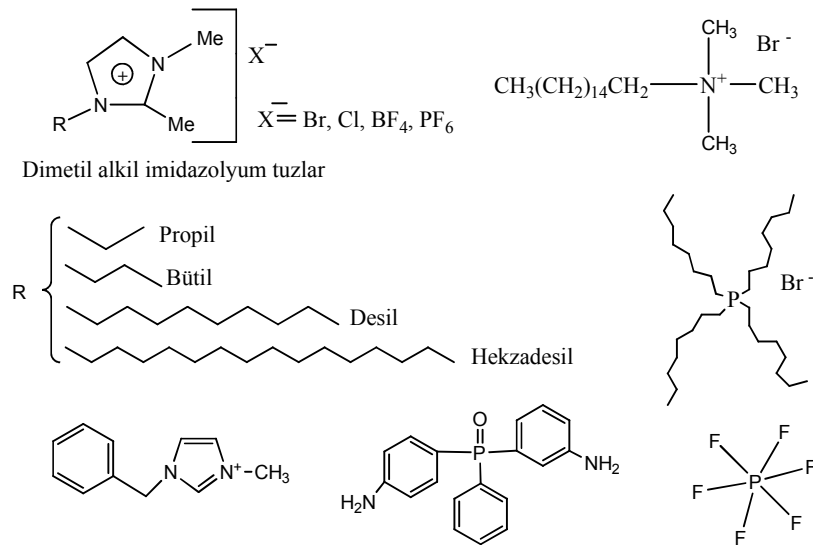
Şekil 8. Organokil sentezi (The synthesis of organoclay)

2:1 grubundan olan montmorillonit killeri, birim hücre aralıklarında tuttuğu iyonların yapısına bağlı olarak şişme özelliğine sahiptir. Bu özellik büyük molekül ağırlıklı bileşiklerin tabakalar arasında difüzyonunun yanı sıra, tabakalar arasındaki katyonların büyük molekül ağırlıklı bileşiklerle yer değiştirebilmelerine de olanak sağlar. Böylece kil Kil yüzeyi, hidrofob özellik kazandırılarak modifiye edilebilir. Reaksiyon sonunda iki netice olur: organik katyonlar aralığa yerleşerek killerin yüzey enerjilerini düşürerek tabaka aralıklarını genişletirler, yüzey özellikleri değişerek hidrofilik yapı hidrofobik veya organofilik yapıya dönüşür [32,33].

Kil boşlukları içinde yer alan Na^+ , Li^+ , Ca^{+2} gibi katyonlar yüzey aktif maddeleriyle yer değiştirme reaksiyonu vermektelerdir. Silikatların modifikasyon işlemi sonucunda tabakaları arasındaki uzaklık artarak yüzey enerjisi düşmekte ve organik polimerlerle kimyasal etkileşimleri artmaktadır. Böylece, uzun alkil zincirleri içeren iyonlarla organo-modifiye edilmiş silikatlar (organokiller) kullanılırken, polimerler silikat tabakaları arasına daha iyi nüfuz edebilir [34]. Galeri içi molekül yoğunluğu veya zincir uzunluğu azaldıkça (veya sıcaklık arttıkça) galeri içinde daha düzensiz sıvıya benzer bir yapı görülmektedir. Bunun yanında, alkil zincir uzunluğu arttıkça, diğer bir deyişle molekül ağırlığı arttıkça, galeri içi yapı daha sıvı kristalin gibi bir yapı gösterir. Yüzey aktif madde olarak kullanılan değişik alkil zincir uzunluklarına sahip alkil amonyum

iyonları ile yapılan deneylerde alkil zincirleri daha uzun (C18-20) olan alkil amonyum iyonlarının silikat tabakaları arasındaki uzaklığı, daha kısa (C9-10) zincirlere sahip iyonlara oranla daha fazla artırdığı görülmüştür. Ayrıca kullanılan birli, ikili, üçlü ve dördü kuaterner iyonları arasında killerin tabaka kalınlığını etkili şekilde artıran iyon, dördü (kuaterner) alkil amonyum iyonu olmuştur [35, 36]. Şekil 9’da farklı tür yüzey aktif maddeleri verilmiştir.

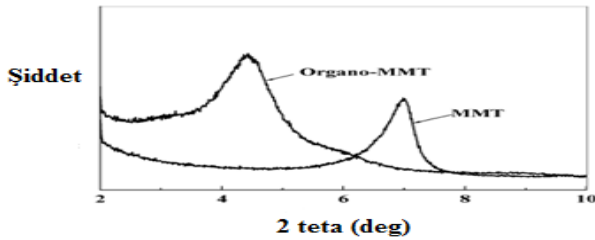
Peng Liu’nun yapmış olduğu çalışmada organokil elde etmek için yüzey aktif maddesi olarak sadece kuaterneramonyum tuzları kullanılmayacağını, ayrıca



Şekil 9. Na^+MMT 'yi organokile dönüştürmede kullanılan bazı yüzey aktif maddeleri (Some surface activation agents used in converting Na^+MMT into organoclay)

polimerik yapıya yüzey aktif maddeleri de killeri organokil haline dönüştürmek için kullanılabileceğini bildirmiştir [37].

Kil tabakaları arasında bazı organik polar gruplar sokularak tabakaların arası açılır. Bu şekilde tabakaları genişletilmiş olan organomodifiye killerde, tabakalar arasında giren organik grubun iyonik etkisine ve büyüklüğüne göre tabakalar arası boşluk da değişir. Bu boşlukların genişlemesi en iyi olarak X-Ray spektrumları ile belirlenebilir. Bir kil türü olan montmorillonit ile organokil haline getirilmiş montmorillonitin, tabakaları arasındaki uzaklık değişimini gösteren X-ışını kırınımı difraksiyonu (XRD) spektrumu Şekil 10'da gösterilmiştir [38]. Buradan da yorumlanabileceği gibi, killeri organokil haline dönüştükçe, tabakalar arası boşlukları açılmaktadır. Ayrıca organokil, nanokompozit yapımında kullanılmasının dışında kıvamlaştırıcı olarak boya, yağ, mürekkep vb. yapımında, kozmetikte, toksik gazları adsorblamada ve kontrollü ilaç salınımında da kullanılmaktadır [39].



Şekil 10. Kil minerallerinde tabakalar arası genişlemeyi gösteren XRD spektrumu (The XRD spectrum that shows the interlayer expansion of the clay minerals) [MMT: Montmorillonit ($2\theta=7.0^\circ$, $d=1.26\text{nm}$), Organo-MMT: Organomodifiye Montmorillonit ($2\theta=4.4^\circ$, $d=1.99\text{nm}$)]

Tabakalı nanopartiküllerin düzenli yapısına ait bir XRD piki vardır ve dağılmış yapıya ulaşırsa bu pik gözlenmez. Araya girmiş yapılarda ise bu pik az şiddette de olsa görülür. Tabakalı nanoparçacığa ait pikin şiddeti ve araya girmiş yapıda şiddeti azalmış pik kullanılarak, tabakalı nanoparçacığın tabakalarının aralanma miktarı Bragg Eşitliği yardımıyla bulunabilir.

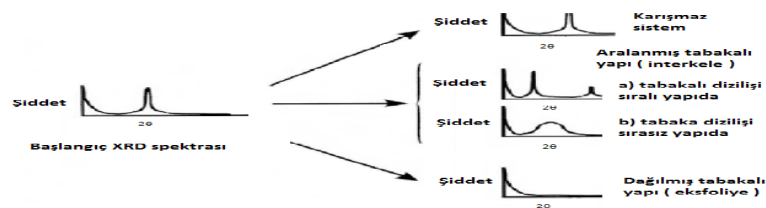
$$n\lambda : 2d \sin \theta$$

n : Kırınım mertebesi

λ : XRD cihazının yaydığı ışının dalga boyu (nm)

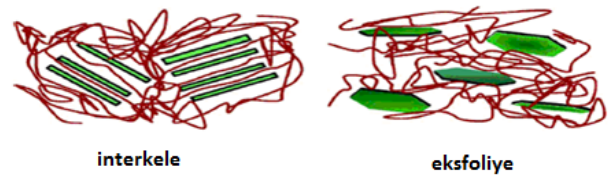
d : İki paralel tabaka arası mesafe (nm)

θ : Kırılma açısı [40].

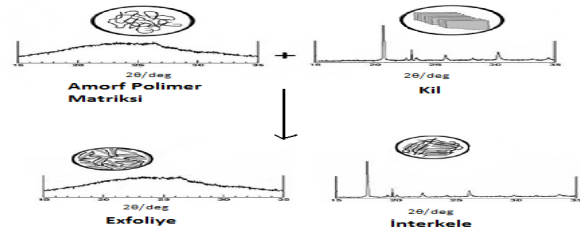


Şekil 13. Nanokompozitlerin farklı yapılarının XRD analizi sonucunda elde edilen grafikler (The graphs obtained by XRD analysis of different structures of nanocomposites)

X-ışını kırınım difraksiyonu, kil tabakalarının dağılımı hakkında kantitatif bilgiler verir. Dağılmış tabakalı sistemlerde, tabakalar periyodik olarak düzenlenmiştir. Bu nedenle kil tabakalarının yansıması X-ışını kırınımı difraksiyon modelinde incelenir. Kil galerisine polimer girişi artarsa, kil tabakalarının temel açıklığı (d- açıklığı) artar ve kil piki yön değiştirir. Bundan dolayı tabakaların ayırımında periyodiklik azalır ve bu da kil piki yoğunluğunu düşürür. Dağılmış tabakalı (eksfoliye) sistemlerde, kil tabakaları, polimer matrisinde rastgele dağılmışsa, X-ışını modelinde kil piki izlenemez. Şekil 11'de Polimer/kil nanokompozitlerde aralanmış (interkele) ve dağılmış yapıdaki (eksfoliye) nanokompozitlerin gösterimi ve Şekil 12'de Polimer/tabakalı silikat nanokompozitlerinin XRD analizi verilmiştir [41-42].



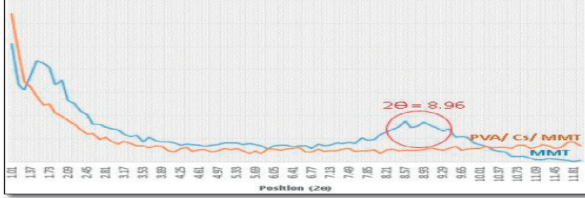
Şekil 11. Aralanmış (interkele) ve dağılmış yapıdaki (eksfoliye) nanokompozitlerin gösterimi [41](The representation of intercalated and exfoliated nanocomposites)



Şekil 12. Polimer/tabakalı silikat nanokompozitlerinin XRD analizi [42] (XRD analysis of polymer/layered silicate nanocomposite)

Şekil 13'te nanokompozitlerin farklı yapılarının XRD analizi sonucunda elde edilen grafikler görülmektedir. Buna göre eğer karışmaz sistem ise yani kil galerisi hiç açılmamış ve plakalar arasında polimer matris girmemiş ise, XRD analizinde sadece bir tane ve dik bir pik gözlenir. Nanokompozit aralanmış tabakalı yapıya (interkele) sahip ise, iki farklı grafik görülme olasılığı vardır. Tabakalar aralanmış, ancak tabakalar arasındaki sıralı diziliş düzeni bozulmuşsa, yani dağılmış tabakalı yapıya (eksfoliye) daha yakın bir tabaka düzeni var ise, dik olmayan bir pik görülür. Eğer tabakalar polimer matris içinde dağılmış ise, hiç pik gözlenmez [42].

Noori ve ark. tarafından sentezlenen Polivinilalkol/kitosan/Montmorillonit (PVA/Cs/MMT) biyokompozit hidrojelinin XRD spektrumunu inceleyecek olursak, (Şekil 14) MMT, $2\theta=8.96^\circ$ 'da bir pik verirken; PVA/Cs/MMT biyokompozit hidrojel, herhangi bir pik vermemiştir. Bu durum sentezlenen biyokompozit hidrojelinin eksfoliyeye yapıda olduğunu, yani kili oluşturan tabakaların polimer matrisi içinde dağıldığını göstermektedir [43].

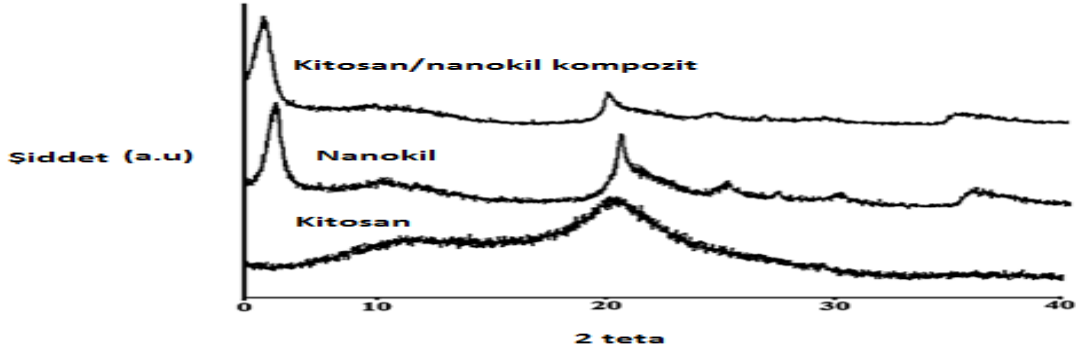


Şekil 14. MMT ve PVA/Cs/MMT biyokompozit örneklerinin XRD spektrumu (XRD spectrum of MMT and polyvinyl alcohol/chitosan/MMT biocomposites)

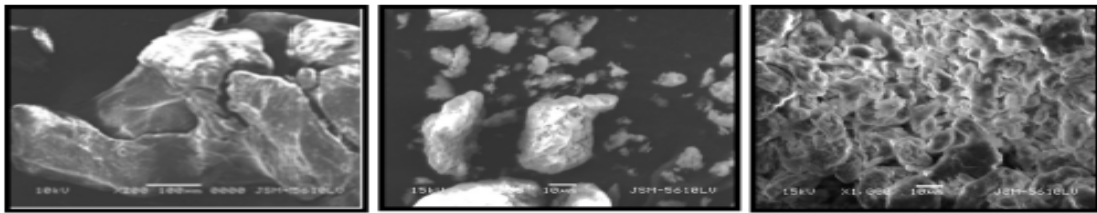
Vanamudan ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada, kitosan/nanokil biyokompozitinin yapısını karakterize etmek için, XRD, TGA, SEM, TEM kullanmışlardır. Bu örnek üzerinde XRD spektrumunu inceleyecek olursak (Şekil 15), kitosan 10.746 ve 19.994'te iki spesifik pik vermiştir. Nanokilin 5.238'de görülen karakteristik piki, kitosan kildeki tabakalar arası boşluğun artmasıyla 4.985'e kaymıştır. Kitosan/nanokil biyokompozitinde kil tabakalarının polimer arasına iyice girmesiyle XRD spektrumunda yayvan bir pik görülmüştür [44].

Aynı çalışmaya ait, Şekil 16 ve 17'de Kitosan, nanokil, kitosan/nanokil kompozit örneklerinin SEM ve TEM fotoğrafları görülmektedir. Burada kitosan matrisi içindeki kil tabakalarının herhangi bir topaklanma olmadan, düzenli şekilde dizildiği görülür. Bu durum elde edilen nanokompozitin adsorpsiyon çalışmalarında başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir.

Şekil 18'de yine aynı çalışmaya ait kitosan, nanokil, kitosan/nanokil biyokompozit örneklerinin



Şekil 15. Kitosan, nanokil, kitosan/nanokil biyokompozit örneklerinin XRD spektrumu (XRD spectrum of Chitosan, nanoclays, chitosan/nanoclay biocomposite)

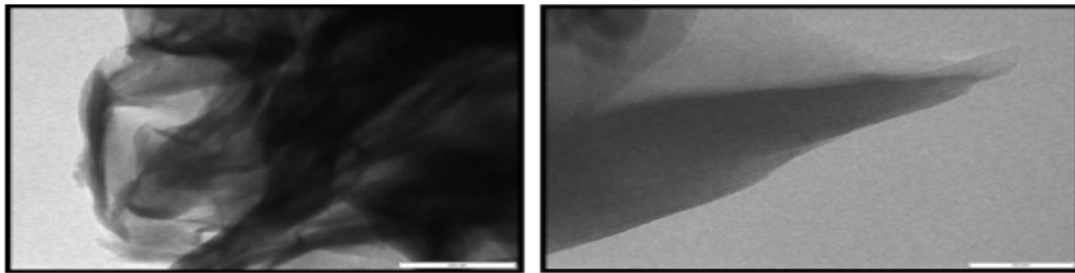


a) Kitosan

b) Nanokil

c) Kitosan/nanokil kompozit

Şekil 16. Kitosan, nanokil, kitosan/nanokil biyokompozit örneklerinin SEM görüntüleri (SEM images of chitosan, nanoclays, chitosan/nanoclay biocomposite)

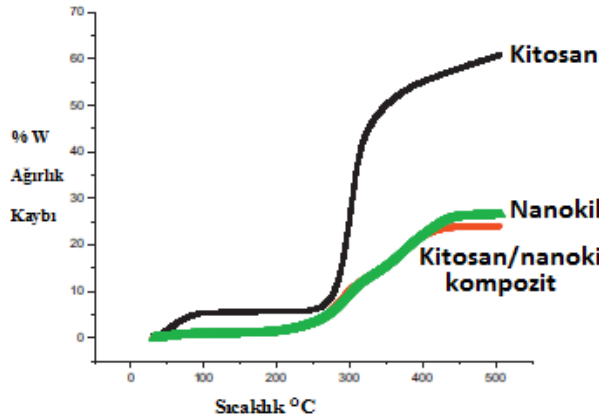


a) Nanokil

b) Kitosan/nanokil kompozit

Şekil 17. Nanokil ve kitosan/nanokil biyokompozit örneklerinin TEM görüntüleri (TEM images of nanoclay and chitosan/nanoclay biocomposite)

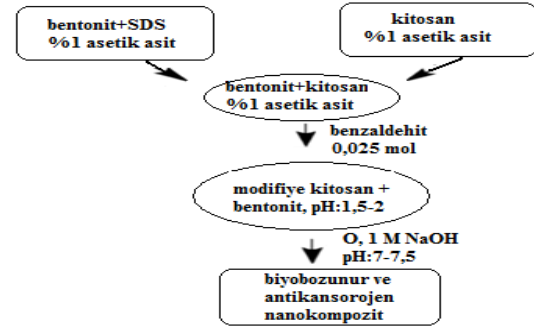
Termogravimetrik Analizleri verilmiş ve üç örnekte de 50-250 °C'deki kütle kaybı, su molekülünün ortamdaki ayrılmasından kaynaklanmıştır. 250-350 °C'deki kitosandaki kütle kaybı, kitosandaki asetil grubunun ayrılması ile bozunmanın başladığını; 290-430 °C'de nanokildeki kütle kaybı ise, organik materyalin bozunduğunu göstermektedir. Kitosan/nanokil biyokompozitindeki bozunma ise, 290-340 °C'deki kitosanın asetil grubunun ayrılması ve 380-460 °C'de organik materyalin bozunmasıyla gerçekleşmiştir [44].



Şekil 18. Kitosan, nanokil, kitosan/nanokil biyokompozit örneklerinin termogravimetrik analizleri (The thermogravimetric analysis of chitosan, nanoclay, chitosan/nanoclay biocomposite)

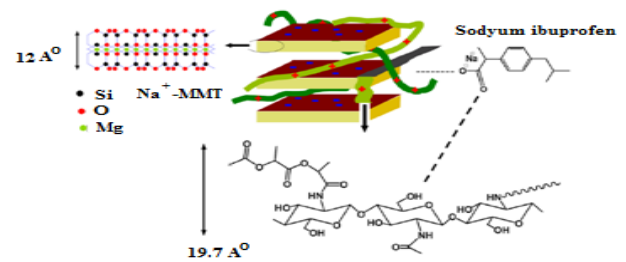
2. BİYOPOLİMER-KİL NANOKOMPOZİTLERİ (BIOPOLYMER-CLAY NANOCOMPOSITES)

Nanoparçacıkların biyobozunur polimerlerle modifiye edilerek güçlendirilmesiyle tamamen farklı özelliklerde yeni malzemeler geliştirilmekte ve bazı materyallerin olumsuz özellikleri iyileştirilebilmektedir [45]. Biyopolimerde mikrobiyal etkiye bağlı olarak parçalanma işlemi sırasında; polimer zincirinde kopma, oksidasyon, hidroliz ve fotobozunma olayları görülebilmektedir. Biyopolimerlerin depolanma ya da kullanım süresince stabil kalması ve istenilen kullanım ömrünü tamamladıktan sonra bir kerede parçalanabilmesi nedeniyle, bu polimerlerin biyokompozit üretiminde kullanılabilmesi için yapısının ve özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir [46]. Çabuk ve ark. yapmış oldukları çalışmada, bentonit kilini organokil haline dönüştürmek için, yüzey aktif madde olarak sodyum dodesilsülfat kullanmışlardır. Kitosan molekülleri benzaldehit ile modifiye edilerek, kitosan/bentonit biyonanokompozitini sentezlemişler, biyonanokompozitin yapısını FTIR, XRD, TGA ve SEM ile karakterize etmişlerdir. Sentez diyagramı Şekil 19'da verilmiştir. Modifiye edilmiş kitosan/bentonit biyonanokompoziti, biyouyumlu ve anti kanserojen özelliklere sahip olduğundan ve çevre dostu olmasından dolayı, çeşitli medikal ve endüstriyel alanda kullanılabilirliği düşünülmüştür [47].



Şekil 19. Kitosan/bentonit biyonanokompozit sentez diyagramı (The synthesis diagram of chitosan/bentonite bionanocomposites)

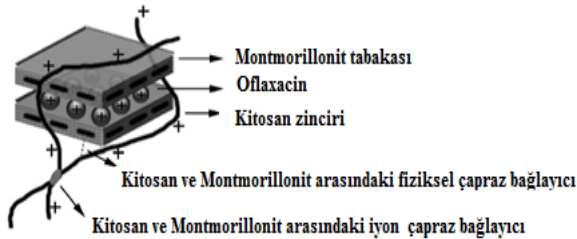
Depan ve ark. yapmış oldukları çalışmada, laktik asiti kitosan üzerine aşılamışlardır. Poli(kitosan-g-laktik asit) aşılı kopolimerinin Na⁺MMT ile kitosan-g-laktik asit/Na⁺MMT biyonanokompozitini sentezlemişler, biyonanokompozitin yapısını XRD, FTIR, TGA, elementel analiz ile karakterize etmişlerdir. Böylece kitosan-g-laktik asit/Na⁺MMT biyonanokompozitinin termal ve fiziksel özelliklerinin poli(laktik asit) ve poli(kitosan-g-laktik asit) aşılı kopolimerinden daha iyi olduğunu tespit etmişlerdir. Kitosan üzerine aşılanmış laktik asit zincirleri plastikleştirici gibi davranarak, esnek film oluşturduğu sonucuna varılmıştır [48]. Aynı grubun yapmış olduğu başka bir çalışmada, kitosan-g-laktik asit/Na⁺MMT biyonanokompozitini sentezlemişler, biyonanokompozitin yapısını FTIR, XRD, SEM ve ¹H-NMR ile karakterize etmişlerdir. Şekil 20'de kitosan-g-laktik asit/Na⁺MMT biyonanokompozitinin sentezi verilmiştir. Bu biyonanokompozitin, kontrollü ilaç salınımında ve doku mühendisliğinde kullanılabilirliğini düşünmüşlerdir. Bu amaçla da, *Sodium Ibuprofen* isimli ilacın taşınmasında sentezledikleri kitosan/kil biyonanokompozitini kullanmışlardır [49].



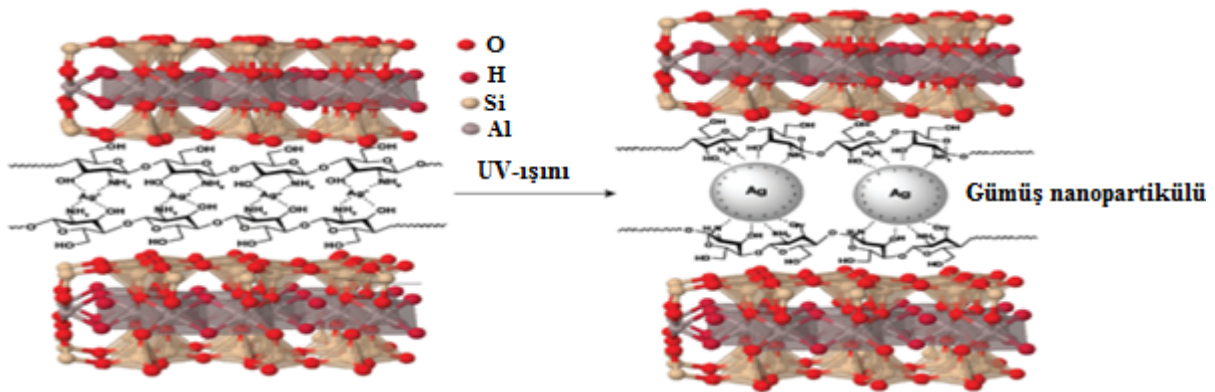
Şekil 20. Kitosan-g-laktik asit/Na⁺MMT biyonanokompozitinin sentezi (The synthesis of chitosan-g-lactic acid/Na⁺ MMT bionanocomposites)

Lin ve ark. yapmış oldukları çalışmada, Na⁺MMT ile potasyumpersülfat kullanarak organokil elde etmişlerdir. Organokili asetik asit içerisindeki kitosanla karıştırarak, kitosan/organokil biyonanokompozitini sentezlemişler, biyonanokompozitin yapısını XRD, TEM, kimyasal analiz elektron mikroskobu (ESCA) ve dinamik ışık saçılması (DLS) ile karakterize etmişlerdir. Biyonanokompozitin mekanik özelliğinin kitosanla

karşılaştırıldığında daha yüksek olduğu sonucuna varılmış ve bu biyanokompozitin biyodegradasyonu geciktirdiği düşünülmüştür [50]. Han ve ark. yaptıkları çalışmada ise, satın alınan kitosan oligomeri ile kitosan/ Na^+MMT biyanokompozitini sentezlemişler, biyanokompozitin yapısını FTIR, TGA ve XRD ile karakterize etmişlerdir. Kitosan/ Na^+MMT biyanokompoziti, ham kitosanla karşılaştırıldığında *Escherichiacoli* and *Staphylococcus aureus* bakterilerine karşı daha fazla antimikrobiyal etki gösterdiği sonucuna varılmıştır [51]. Wang ve ark. ise, kitosanı modifiye ederek karboksimetil kitosanı oluşturmuşlar ve ardından N,N,N-Trimetilkitosan klorür, modifiye kitosanlar ve Na^+MMT ile biyanokompozitlerini sentezlemişler, biyanokompozitlerin yapısını FTIR, TGA, $^1\text{H-NMR}$ ve TEM ile karakterize etmişlerdir. Elde edilen bu biyanokompozitin sadece termal özelliklerini değil, aynı zamanda biyobozunurluk, mekanik ve bariyer özelliklerini de önemli derecede geliştirdiği sonucuna varmışlardır [52]. Hua ve ark. yaptıkları çalışmada, sentetik antibiyotik olan ofloxacin kullanarak, kitosan/ofloxacin/MMT biyanokompozit hidrojelini sentezlemişler ve FTIR ve XRD ile karakterize etmişlerdir. Anyonik çapraz bağlayıcı olarak sodyumtripolifosfat kullanmışlardır. İlaç taşıma sisteminde kitosan boncukları pH=1,2'de 3 saat içerisinde bozulurken, sentezlenen biyanokompozit hidrojelini ise, 12 saatte bozduğu yapılan analizler sonucunda tespit edilmiştir. Şekil 21'de biyanokompozitin yapısı verilmiştir [53].



Şekil 21. Kitosan/ofloxacin/montmorillonit biyanokompozitinin yapısı (The structure of chitosan/ ofloxacin/ montmorillonite bionanocomposites)



Şekil 22. Ag/montmorillonit/kitosan biyanokompozitinin UV ışınıyla sentezlenmesi (The synthesis of Ag/ montmorillonite/ chitosan biocomposite by UV ray)

Shameli ve ark. yapmış oldukları çalışmada, Ag nanopartiküllerini UV ışını kullanarak, Ag/kitosan/montmorillonit biyanokompozitini sentezlemişler ve bu Şekil 22'de gösterilmiştir. Bu durum montmorillonitin kristal yapısının değişmesine, bazal boşlukların genişlemesine ve biyanokompozitin yüzey morfolojisinin değişmesine yol açmıştır. Biyanokompozitin yapısındaki bu değişimleri FTIR, UV, XRD, SEM ve TEM ile tespit etmişlerdir. Ayrıca biyanokompozitin yüksek oranda antibakteriyel aktiviteye sahip olduğu tespit edilmiş ve biyomedikal alanda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [54].

Zhang ve ark. yapmış oldukları çalışmada, akrilik asit monomerini kitosan üzerine aşılamışlardır. Kitosan-g-akrilik asit aşılı kopolimerinin Na^+MMT ile biyanokompozitini sentezlemişler ve yapılarını FTIR, XRD, SEM, TEM ile karakterize etmişlerdir. Böylece biyanokompozitin su adsorplama kapasitesinde akrilik asit, kitosan ve montmorillonit miktarlarının etkisi araştırılmıştır. Kitosan-g-akrilik asit/ Na^+MMT biyanokompozitinin suyu iyi bir şekilde adsorpladığı tespit edilmiştir [55]. Yu ve ark. yapmış oldukları çalışmada, bütül akrilat monomerini ^{60}Co γ -ışın saçılması polimerizasyon yöntemini kullanarak kitosan üzerine aşılamışlardır. Poli(kitosan-g-bütülakrilat) aşılı kopolimerinin Na^+MMT ile biyanokompozitini sentezlemişler, yapısını XRD, TGA ve Dinamik Mekanik Analiz ile karakterize etmişlerdir. Ayrıca çekme testleri ve su adsorplama kapasitesi özelliklerini de araştırmışlardır. %3'lük kil ilavesinin bile biyanokompozitin, termal özellikleri, mekanik özellikleri ve su adsorplama direncinde önemli değişimlere sebep olduğunu tespit etmişlerdir. Bu biyanokompozitlerin endüstri ve ziraat alanında önemli uygulama alanına sahip olacağı düşünülmüştür [56].

Başka bir çalışmada, Çiftçi ve ark. kitosan polimeri ile polivinil alkol (PVA) polimerini kullanarak elektrostatik lif çekim yöntemiyle nanolif elde etmişlerdir. Çapraz bağlayıcı olarak çözeltiliye glüteraldehit ilave edilmiş, çekilen nanoliflerin arasına bentonit nanokili konularak, PVA/kitosan/bentonit biyanokompozitini sentezlemişler, yapısını FTIR, TGA ve SEM ile karakterize etmişlerdir. Böylece, elektrostatik lif çekim yöntemi

kullanılarak elde edilen nanokil katkılı bu biyonompozitin nanolif yüzeylerin adsorpsiyon çalışmalarında, adsorban olarak kullanılabilmesi düşünülmüştür [57]. Wang ve ark. yapmış oldukları çalışmada ise, farklı oranlarda montmorillonit kili ve kitosan kullanarak kitosan/kil biyonompozitlerini sentezlemişler ve yapılarını FTIR ve XRD ile karakterize etmişlerdir. Biyonompozitlerin farklı pH ve sıcaklık aralığındaki sulu çözeltide Congo Redin (kırmızı boya) adsorpsiyon kapasitesini ayrı ayrı ölçmüşlerdir. Kitosan/kil biyonompozitlerin adsorpsiyon kapasitesinin, kitosanın ve montmorillonitin kendisine göre daha fazla olduğunu tespit etmişlerdir. Bu yüzden kirli atık çözeltilerindeki Congo Redin uzaklaştırılmasında etkili bir adsorban olacağı düşünülmüştür [58]. Aynı ekibin yapmış olduğu başka bir çalışmada ise, Na⁺MMT ile setiltrimetilamonyum bromür yüzey aktif maddesi ile organokil elde etmişler ve kitosan/organokil biyonompozitini sentezlemişlerdir. Kompozitin yapısını FTIR, XRD, SEM ve TEM ile karakterize etmişler ve biyonompozitin sulu çözeltideki Congo kırmızısını adsorplama kapasitesinin, organokil ve kitosana göre daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır [59].

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Polimer-kil içerikli biyonompozitler, yanmazlık özelliği, gaz ve su buharına karşı bariyer özellikleri, iyonik iletkenlik, ısıl genleşme kontrolü özelliklerinden dolayı malzemelerin termal ve mekanik özelliklerini iyileştirmektedir. Ayrıca otomobil parçaları, yiyecek paketleme, havacılık, elektrooptik sistemler ve akıllı aygıtlarda da uygulama sahası bulmuştur. Biyopolimer-kil nanokompozitlerin belirtilen alanların çoğunda uygulama alanı bulması zordur. Çünkü biyopolimerler materyal özellikleri bakımından sentetik polimerlere göre daha sınırlı çalışma sahasına sahiptir. Bu yüzden, biyopolimer-kil nanokompozitlerinin kullanım alanı, diğer polimer-kil biyonompozitlerine göre sınırlı kalmaktadır. Biyopolimer-kil nanokompozitlerinin çalışma sahası olarak, atık suların temizlenmesi, biyomedikal ve yiyecek paketleme vb. örnek olarak verilebilir [60]. Kitosan-kil biyonompozitleri, antimikrobiyal ve biyodegradasyon özelliklerinden dolayı; yiyeceklerin paketlenmesinde, biyomedikal alanda ise; kontrollü ilaç salınımında, diş tedavisinde, iskeletteki kemik kırılmalarında, kemik yerine destek organ olarak ve kirli atık sulardaki yabancı maddelerin uzaklaştırılmasında kullanılmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bordes P.E., Avérous P.L., "Nano-biocomposites: biodegradable polyester/nanoclay systems", *Progress in Polymer Science*, 34:125-155, (2009).
- Petersson L., Oksman K., "Biopolymer based nanocomposites: comparing layered silicates and microcrystalline cellulose as nanoreinforcement composites", *Science and Technology*, 66:2187-2196, (2006).
- Ave'rous L., "Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: a review", *Journal of Macromolecular Science PartC-Polymer Reviews*, C44: 231-274, (2004).
- Briassoulis D., "An overview on the mechanical behavior of biodegradable agricultural films", *Journal of Polymers and the Environment*, 12(2):65-81, (2004).
- Han J.H., Gennadios A., "Edible films and coatings: a review", *In: Innovations in Food Packaging (Han, J. H ed.)*, Elsevier Academic Press, San Diego, CA. 239-262, (2005).
- Dursun S., Erkan N., Yeşiltaş M., "Doğal biyopolimer bazlı (biyobozunur) nanokompozit filmler ve su ürünlerindeki uygulamaları", *Journal of Fisheries Sciences.com*, 4(1):50-77, (2010).
- Canbaz E.G., Güngör N., "Kil/kitosan ve organokil/kitosan nanokompozitlerinin üretimi ve karakterizasyonu", *İTÜ Dergisi/c Fen Bilimleri*, 7: 45-53, (2009).
- Ke Y.C., Stroeve P., "Polymer-layered silicates and silica nanocomposites", Chapter 2, 104, (2005).
- Anan N.A., Hassan S.M., Saad E.M., Butler I.S., Mostafa S.I., "Preparation, characterization and pH-metric measurements of 4-hydroxysalicylidenechitosan schiff-base complexes of Fe(III), Co(II), Ni(II), Cu(II), Zn(II), Ru(III), Rh(III), Pd(II) and Au(III)" *Carbohydrate Research*, 346:775-793, (2011).
- Shepherd R., Reader S., Falshaw A., "Chitosan functional properties", *Glycoconjugate Journal*, 14: 535-542, (1997).
- Shadidi F.R., Abuzaytoun R., "Chitin, chitosan, and coproducts: chemistry, production, applications, and health effects", *Advances in Food and Nutrition Research*, 49:93-135, (2005).
- Çabuk M., "Bazı biyobozunur polimerlerin modifikasyonu ve elektrokimyasal özelliklerinin incelenmesi" **Doktora Tezi**, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 173: (2012).
- Kurita K., "Chitin and chitosan: functional biopolymers from marine crustaceans", *Marine Biotechnology* 8(3):203-226, (2006).
- Rao M.S., Stevens W.F., "Chitin production by lactobacillus fermentation of shrimp biowaste in a drum reactor and its chemical conversion to chitosan", *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 80(9):1080-1087.
- Duman S.S., Şenel S., "Kitosan ve veteriner alandaki uygulamaları", *Veteriner Cerrahi Dergisi*, 10(3-4): 62-72, (2004).
- Şaşmaz H., "Hibrit kitosan/PCL doku iskelelerinin elektro-eğirme tekniği ile üretimi ve hücre kültürü uygulamaları", (2010).
- Synowiecki J., Al-khatteb A., Nadia A., "Production, properties, and some new applications of chitin and its derivatives", *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 43:145-171, (2003).
- Burkhanova N.D., Yugai S.M., Pulatova K.P., Voropaeva G.V., Rashidova S.S., "Structural investigations of chitin and its deacetylation products", *Chemistry of Natural Compounds*, 36: 352-355, (2000).
- Hai L., Diep T.B., Nagasawa N., Yoshii F., Kume T., "Radiation depolymerization of chitosan to prepare oligomers", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 208:466-470, (2003).

20. www.mpikg.mpg.de/886855/Polysaccharide.pdf, Supramolecular Biopolymers II, Chapter 2, 73.
21. Grim R.E., "Clay mineralogy", **McGraw-Hill**, USA, 596, (1968)
22. Qian G., Lan T., "Handbook of polypropylene and polypropylene composites", Edited by Harutun G. Karian, **Second edition, Marcel Dekker**, New York, 20: (2003).
23. Adams J.M., "Determination of the cation-exchange capacity (layer charge) of small quantities of clay minerals by nephelometry", **Clay and Clays minerals**, 27: 137-139, (1979).
24. Yano K., Usuki A., Okada A., "Synthesis and properties of polyimide-clay hybrid films", **John Wiley & Sons, Inc.**, 35:2289-2294, (1997).
25. Utracki L.A., "Clay-containing polymeric nanocomposites", Volume 1, **Rapra Technology Limited**, 434: (2004).
26. Pavlidou S., Papaspyrides C.D., "A review on polymer-layered silicate nanocomposites", **Progress in Polymer Science**, 32:1119-1198, (2008).
27. Mittal V., "Polymer layered silicate nanocomposites: a review" **Materials**, 2:992-1057, (2009).
28. Markarian J., "Automotive and packaging offer growth opportunities for nanocomposites", **Plastics, Additives and Compounding**, 7:18-21, (2005).
29. Paiva L.B., Morales A.N., Valenzuela F.R., "Organoclay: properties, preparation and applications", **Applied Clay Science**, 42:8-24, (2008).
30. Ogawa M., Handa T., Kuroda K., Kato C., "Formation of organoammonium-montmorillonite by solid-state reactions", **Chemistry Letters**, 19: 71-74, (1990).
31. Çalimli A., "Nanokil-polimer kompozitlerinin sentez ve karakterizasyonu", **Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri**, Proje Numarası: 2080745001, (2008).
32. İşçi S., Ece Ö.I., Güngör N., "Characterization of rheology, electrokinetic properties and surface micromorphology of DTABr/MMT and CPBr/MMT organoclays", **Journal of Composite Materials**, 40: 1105-1115, (2006).
33. Mandalia T., Bergaya, F., "Organo clay mineral-melted polyolefin nanocomposites effect of surfactant/CEC Ratio", **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, 67: 836-845, (2006).
34. Alexandre M., Dubois P., "Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of new class of materials", **Materials Science and Engineering**, 28:1-63, (2000).
35. Xiao W., Zhan M., Li Z., "Organically modifying and modeling analysis of montmorillonites", **Materials and Design**, 24: 455-462, (2003).
36. Vaia R.A., Teukolsky R.K., Giannelis E.P., "Interlayer structure and molecular environment of alkylammonium layered silicates", **Chemistry of Materials**, 6:1017-1022, (1994).
37. Liu P., "Polymer modified clay minerals: A review", **Applied Clay Science**, 38: 64-76, (2007).
38. Zhang Y.H., Wu J.T., Fu S.Y., Yang S.Y., Li Y., Fan L., Li R.K.Y., Li L.F., Yana Q., "Studies on characterization and cryogenic mechanical properties of polyimide-layered silicate nanocomposite films", **Polymer**, 45:7579-7587, (2004).
39. Atıcı, O., "Yüzey aktif maddeler", **İTÜ Fen-Edebiyat Fakültesi Yayınları**, 1991, İstanbul.
40. Thomas V., Yallapu M.M., Sreedhar B., Bajpai S.K., "A versatile strategy to fabricate hydrogel-silver nanocomposites and investigation of their antimicrobial activity", **Journal of Colloid and Interface Science**, 315(1): 389-395, (2007).
41. Ray S.S., Bousmina M., "Biodegradable polymers and their layered silicate nanocomposites", **Progress in Materials Science**, 50: 962-1079, (2005).
42. Anaklı D., "Poli(2-EtilAnilin)-Kaolinit" malzemelerin hazırlanması ve özelliklerinin incelenmesi, **Yüksek Lisans Tezi**, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2008).
43. Nooria S., Kokabia M., Hassan Z.M., "Nanoclay enhanced the mechanical properties of poly(vinyl alcohol)/chitosan/montmorillonite nanocomposite hydrogel as wound dressing", **Procedia Materials Science**, 11: 152 - 156, (2015).
44. Vanamudan A., Pamidimukkala P., "Chitosan, nanoclay and chitosan-nanoclay composite as adsorbents for rhodamine-6G and the resulting optical properties", **International Journal of Biological Macromolecules**, 74, 127-135, (2015).
45. Wang S.F., Shen L., Tong Y.J., Chen L., Phang I.Y., Lim P.Q., Liu T.X., "Biopolymer chitosan/ montmorillonite nanocomposites: preparation and characterization", **Polymer Degradation and Stability**, 90:123-131, (2005).
46. Bulut Y., "Selüloz esaslı doğal liflerin kompozit üretiminde takviye materyali olarak kullanımı", **The Journal of Textiles and Engineers**, 18:26-35, (2011).
47. Çabuk M., Yavuz M., Hlavá J., "Biyobozunur ve anti-kanserojen kitosan/benzaldehit modifikasyonu ve nanokompozitin hazırlanması", **Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, 27:247-251, (2011).
48. Depan D., Kumar A.P., Singh R.P. "Preparation and characterization of novel hybrid of chitosan-g-lactic acid and montmorillonite", **Journal of Biomedical Materials Research Part A**, 78:372-382, (2006).
49. Depan D., Kumar A.P., Singh R.P., "Cell proliferation and controlled drug release studies of nanohybrids based on chitosan-g-lactic acid and montmorillonite", **Acta Biomaterialia**, 5:93-100, (2009).
50. Lin K.F., Hsu C.Y., Huang T.S., Chiu W.Y., Lee Y.H., Yong T.H., "A novel method to prepare chitosan/montmorillonite nanocomposites", **Journal of Applied Polymer Science**, 98:2042-2047, (2005).
51. Han Y.S., Lee S.H., Choi K.H., Park I. "Preparation and characterization of chitosan-clay nanocomposites with antimicrobial activity", **Journal of Physics and Chemistry of Solid**, 71: 46-467, (2010).
52. Wang S., Chen L., Tong Y. "Structure-property relationship in chitosan-based biopolymer/montmorillonite nanocomposites", **Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry**, 44:686-696, (2006).
53. Hua S., Yang H., Wang W., Wang A., "Controlled release of ofloxacin from chitosan-montmorillonite hydrogel", **Applied Clay Science**, 50:112-117, (2010).
54. Shameli K., Ahmad M.B., Yunus W.M.Z.W., Rustaiyan A., Ibrahim, N.A., Zargar M., Abdollahi, Y., "Green synthesis of silver/montmorillonite/chitosan bionanocomposites using the UV irradiation method and evaluation of

- antibacterial activity”, *International Journal of Nanomedicine*, 5:875-887, (2010).
55. Zhang J., Wang L., Wang A., “Reparation and properties of chitosan-g-poly(acrylic acid)/montmorillonite superabsorbent nanocomposite via in situ intercalative polymerization”, *Industrial Engineering Chemistry Research*, 46: 2497-2502, (2007).
56. Yu L., Li L., Wei’an Z., Yue’e F., “A new hybrid nanocomposite prepared by graft copolymerization of butyl acrylate onto chitosan in the presence of organophilic montmorillonite”, *Radiation Physics and Chemistry*, 69:467-471, (2004).
57. Çiftçi Ş., Özek S., Aksoy S.A., Aksoy K., Göde, F., “Nanokil katkılı PVA/kitosan nanolif sentezi ve karakterizasyonu”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Dergisi*, 10 (1):118-128, (2015).
58. Wang L., Wang A., “Adsorption characteristics of congo red onto the chitosan/montmorillonite nanocomposite”, *Journal of Hazardous Materials*, 147:979-985, (2007).
59. Wang L., Wang A., “Removal of congo red from aqueous solution using a chitosan /organomontmorillonite nanocomposite”, *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 82: 711-720, (2007).
60. John J.M., Thomas S., “Natural polymers”, *RSC Green Chemistry, 1: Composites*, 254, (2012).

Dik Kesme İşleminde Kalıcı Gerilmelerin Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Modellenmesi

Mehmet AYDIN

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Endüstri Ürünleri Tasarımı Bölümü

(Geliş / Received : 05.11.2015 ; Kabul / Accepted : 20.03.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, düzlemsel gerinim koşulları altında iş parçasında oluşan kalıcı gerilmeleri tahmin etmek için dik kesme sürecinin ısı-mekanik sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Kalıcı gerilmeleri belirlemek için uyarlamalı ağ ve açık dinamik çözüm teknikleri kullanılarak Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) formülasyonlu sonlu eleman (SE) modeli kurulmuştur. 20NiCrMo5 çeliğinin dik kesme süreci için SE benzetimleri tamamlandığında, kesici takım geri çekilmiş ve gerilmeler yatıştırılmıştır. Benzetim sonuçları, işlenen yüzeyin çekme gerilmelerine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Tahmin edilen kalıcı gerilmeler literatürde mevcut deneysel olarak ölçülen verilerle de karşılaştırılmıştır. SE benzetimlerinden elde edilen işlenen yüzeyin kalıcı gerilmeleri oldukça makul bir doğruluğa sahiptir. SE analizlerinden belirlenen teğetsel kalıcı gerilme değerleri kesme parametrelerini eniyilemek ve mekanik bileşenlerin ömrünü artırmak için kullanılabilir.

Anahtar Kelimeler: Arbitrary Lagrangian Eulerin formülasyonu; dik kesme; kalıcı gerilme; sonlu eleman modelleme

Finite Element Modeling of The Residual Stresses In Orthogonal Machining Process

In this work, a thermo-mechanical numerical analysis of orthogonal machining process is performed to estimate the residual stresses induced in workpiece under plane-strain conditions. To determine the residual stresses, a finite element (FE) model with Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) formulation is established by employing adaptive meshing and explicit dynamics solution techniques. When FE simulations are completed for the orthogonal cutting process of 20NiCrMo5 steel, the cutting tool is withdrawn and the stresses are relieved. The results reveal that the machined surface is tensile stresses. The estimated residual stresses are also compared with experimentally measured data available in the literature. The residual stresses of the machined surface obtained from the FE simulations have a quite reasonable accuracy. The values of the tangential residual stresses determined from the FE analyses can be utilized to optimize cutting parameters and improve the life of mechanical components.

Keywords: Arbitrary Lagrangian Eulerin formulation; orthogonal cutting; residual stress; finite element modeling

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Tornalama, frezeleme ve delme gibi talaşlı imalat süreçleri iş parçalarının yüzey katmanında kalıcı gerilme olarak adlandırılan gerilmelere sebep olmaktadır. Bu gerilmeler kesici takım, iş parçası malzemesi ve kesme parametrelerinden önemli derecede etkilenmektedir ve iş parçalarının fonksiyonel davranışını belirleme bakımından önemlidir. Bu sebeple, yorulma, kırılma ve gerilme korozyonu gibi hasarların azaltılabilmesi için işlenen parçalardaki kalıcı gerilme durumunu kontrol etmek ve anlamak gereklidir.

Talaş kaldırma sırasında oluşan kalıcı gerilmeleri incelemek için analitik modeller [1, 2], sonlu eleman benzetimleri [3–5] ve deneysel yöntemler [6, 7] geliştirilerek çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Deneysel teknikler zaman alıcı ve oldukça maliyetlidir. Analitik yaklaşımlar süreç parametrelerinin karmaşıklığından dolayı çeşitli varsayımlara dayalıdır. Sonlu elemanlar yöntemi ise talaş kaldırma sürecini incelemek için etkin olarak kullanılmaktadır. Talaş kaldırma sürecini sonlu

elemanlar yöntemi ile modellemek için Lagrangian, Eulerian ve Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) olmak üzere üç farklı çözüm yöntemi kapalı ve açık zaman integrasyon teknikleri ile birlikte kullanılır. Kapalı zaman integrasyon tekniği doğrusal statik problemlerine, açık zaman integrasyon tekniği ise doğrusal olmayan dinamik problemleri çözmek için uygulanmaktadır. Lagrangian yaklaşımında sonlu eleman ağı malzemeye atanır ve malzeme ile birlikte hareket eder. Bu yaklaşım geçici bir süreci basit bir şekilde benzetim yapmak için kullanılmaktadır. Ancak, eleman distorsiyonu önemli bir problemdir. Eulerian yaklaşımı genellikle büyük deformasyon problemleri için uygulanır. Sonlu eleman ağı boşlukta sabittir ve sayısal problemlere sebep olmaksızın büyük şekil değiştirmelere müsaade eden eleman yüzeyleriyle malzeme akmaktadır. Eulerian yaklaşımı yeniden sonlu eleman ağı oluşturma algoritmalarına ihtiyaç duymamaktadır. Küçük elemanlardan oluşan sonlu eleman ağına ihtiyaç duyuldukça artan çözüm süresi Eulerian yaklaşımının başlıca dezavantajıdır. Arbitrary Lagrangian Eulerin (ALE) yaklaşımı yukarıdaki iki temel yaklaşımın en iyi özelliklerini birleştirmektedir ve hızlı yakınsama için açık integrasyon çözümünü

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: mehmet.aydin@bilecik.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 297-304

kullanılmaktadır. Bu tekniğin avantajı sonlu eleman ağ yapısını dinamik olarak tanımlama serbestliğidir. Lagrangian yaklaşımının tipik eleman distorsiyonu problemi de bu teknik kullanılarak azaltılabilir.

Talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman modelleri kesme hızı, takım geometrisi ve ilerleme miktarı gibi kesme parametrelerinin kalıcı gerilmeler üzerindeki etkisini belirlemek için kullanılmıştır. Shet ve Deng [8] takım-talaş ara yüzü boyunca sürtünme ve talaş açısının etkilerini incelemiş ve bu parametrelerin kalıcı gerilmeler ve şekil değiştirmeler üzerinde doğrusal olmayan etkilere sahip olduğunu tespit etmiştir. Salio vd. [9] sonlu eleman kodu MSC. Marc. ile kesme parametrelerinin etkisini inceleyerek tahmin edilen ve deneysel olarak elde edilen gerilme değerleri arasında tatmin edici bir uyum bulmuştur. Miguelez vd. [10] ALE sonlu eleman yaklaşımını kullanarak dik kesme sırasında oluşan kalıcı gerilmeleri incelemiş ve çekme gerilmelerinin hem ısı hem de mekanik etkilerden kaynaklandığı sonucuna varmıştır. Liu ve Guo [11] AISI 304 çeliğinin işlenen katmanındaki kalıcı gerilmeler üzerinde ardışık kesme ve takım-talaş sürtünmesinin etkisini incelemek için bir sonlu eleman modeli önermiştir. Bu model, ikinci kesme gerçekleştirildiğinde kalıcı gerilmelerde azalma meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, işlenen yüzeydeki kalıcı gerilmelerin takım-talaş ara yüzünün sürtünme koşuluna duyarlı olduğu bulunmuştur. Guo ve Liu [12] de kalıcı gerilmeler üzerinde ardışık kesmelerin etkisini incelemek için aynı iş parçası malzemesini kullanarak benzer bir çalışma sunmuştur. Bu çalışma, kritik bir değer altındaki deforme olmamış talaş kalınlığında yapılan ikinci kesme sonucunda basma kalıcı gerilmelerin meydana gelebileceğini göstermiştir.

Talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman benzetimleri kesme koşullarının eniyilemesine ve en uygun işleme koşullarını kullanarak kalıcı gerilmelerin azaltılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, pinyon dişli yapımında kullanılan 20NiCrMo5 çeliğinin işlenmesinde oluşan kalıcı gerilmeleri incelemek için düzlemsel gerinim koşulları altında dik kesme sürecinin sonlu eleman analizi yapılmıştır. Talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman benzetimleri için Lagrangian sınırlarına sahip ALE yaklaşımı uygulanmıştır. Benzetimler sonucunda, iş parçası yüzeyinde ve işlenen yüzeyin altında meydana gelen kalıcı gerilme büyüklükleri elde edilmiştir.

2. SONLU ELEMAN MODELLEME (FINITE ELEMENT MODELING)

Bu çalışmada, ABAQUS sonlu eleman yazılımı ile talaş oluşumunun benzetimini yapmak için Lagrangian yaklaşımı kullanılmıştır. Lagrangian yaklaşımında sonlu eleman ağı malzeme ile birlikte akmaktadır [13]. Ancak, eleman distorsiyonu önemli bir sorundur [14]. Lagrangian yaklaşımının tipik eleman distorsiyonu problemini azaltmak ve hızlı yakınsama için açık integrasyon çözümünü kullanan Arbitrary Lagrangian

Eulerin (ALE) yaklaşımı uygulanmıştır. Tanımlanan ALE yaklaşımında sonlu eleman modeli Prasad'ın modeline [5] benzerdir.

2.1. İş Parçası ve Kesici Takım Malzemeleri (Workpiece and Cutting Tool Materials)

Kamyonlarda tork aktarımını sağlayan pinyon dişli yapımında kullanılan 20NiCrMo5 çeliği iş parçası malzemesi olarak seçilmiştir. İş parçası malzemesi plastik davranışını tanımlamak için Johnson-Cook (JC) malzeme modeli [15] kullanılmıştır. Bu model, Denklem (1)'de gösterildiği gibi, şekil değiştirme, şekil değiştirme hızı ve sıcaklığın fonksiyonu olarak akış gerilmesini tanımlamaktadır:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon})^n] \left[1 + C \ln\left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}\right) \right] \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m \right] \quad (1)$$

burada A oda sıcaklığında ve $1/s$ şekil değiştirme hızındaki akma dayanımı, B plastik deformasyonun başlangıcındaki akma dayanımı, C şekil değiştirme hızı faktörü, $\bar{\epsilon}$ eşdeğer plastik şekil değiştirme, $\dot{\bar{\epsilon}}_0$ referans şekil değiştirme hızı, $\dot{\bar{\epsilon}}$ malzeme şekil değiştirme hızı, n işlem-sertleşmesi üssü, m ısı yumuşama üssü, T_r oda sıcaklığı ve T_m iş parçası malzemesi eğrime sıcaklığıdır. 20NiCrMo5 çeliğinin talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman analizi için JC malzeme modelinin parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. 20NiCrMo5 çeliği için Johnson-Cook modelinin parametreleri (Constants of the Johnson-Cook model for 20NiCrMo5 steel) [4]

Malzeme	20NiCrMo5 çeliği
A (MPa)	490
B (MPa)	600
n	0.21
m	0.6
C	0.015
$\dot{\bar{\epsilon}}_0$ (s^{-1})	1
T_r ($^{\circ}C$)	20
T_m ($^{\circ}C$)	1900

Johnson-Cook (JC) modeli iş parçası malzemesinin plastik davranışını tanımlamaktadır. Benzetim için gerekli diğer malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. İş parçası malzemesi için fiziksel özellikler (The physical properties for the workpiece material) [4]

Özellikler	İş parçası (20NiCrMo5)
Yoğunluk (Kg/m^3)	7800
Poisson oranı	0.3
Elastikiyet modülü (GPa)	210
Özgül ısı ($J/Kg/^{\circ}C$)	556

Isıl iletkenlik (W/m°C) 47.7

Isıl genleşme (µm/m°C) 1.2

Analitik rijit bir gövde olarak modellenen kesici takımın malzemesi tungsten karbür olup, malzeme özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

Çizelge 3. Kesici takım malzemesi için fiziksel özellikler (The physical properties for the cutting tool material) [4]

Özellikler	Kesici takım (karbür)
Yoğunluk (Kg/m ³)	1500
Poisson oranı	0.3
Elastikiyet modülü (GPa)	800
Özgül ısı (J/Kg°C)	203
Isıl iletkenlik (W/m°C)	46
Isıl genleşme (µm/m°C)	4.7

2.2. Sınır Koşulları ve Model Geometrisi (Boundary Conditions and Model Geometry)

Şekil 1 sabit kesme hızında hareket eden iş parçasından sürekli talaşın oluşturulduğu dik kesme sürecinin sonlu eleman modelini göstermektedir. Talaş kaldırma sürecinin benzetimini yapmak için 20NiCrMo5 çeliği iş parçası Lagrangian sınır koşullu modellenmiştir ve 2mm×5mm boyuta sahiptir. Talaş iş parçasından ayrıldığında elemanların aşırı deformasyonunu önlemek için talaş katmanı eğimli elemanlardan oluşturulmuştur. Kesme yönü ile bu elemanların eğimi arasındaki açı 64° dir. İş parçasının yüzey özellikleri üzerinde kesici takım

yarıçapına (r_β), 6° talaş açısına (γ) ve 6° boşluk açısına (α) sahip kesici takım analitik rijit bir gövde olarak modellenmiştir. Sınır koşulları hem iş parçası hem de kesici takım için uygulanmıştır. İş parçasının y eksenindeki yer değiştirmesi sınırlandırılmış ve x eksenindeki hareketi serbest bırakılmıştır. Kesici takım sabittir ve tüm yönlerdeki hareketi sınırlandırılmıştır. Modelin tüm düğüm noktalarının başlangıç sıcaklığı 20 °C dir. Benzetimler sabit kesme hızı (V_c), farklı ilerleme hızları (f) ve kesme derinliklerinde (a) yapılmıştır. Tablo 4 kesme koşullarını göstermektedir.

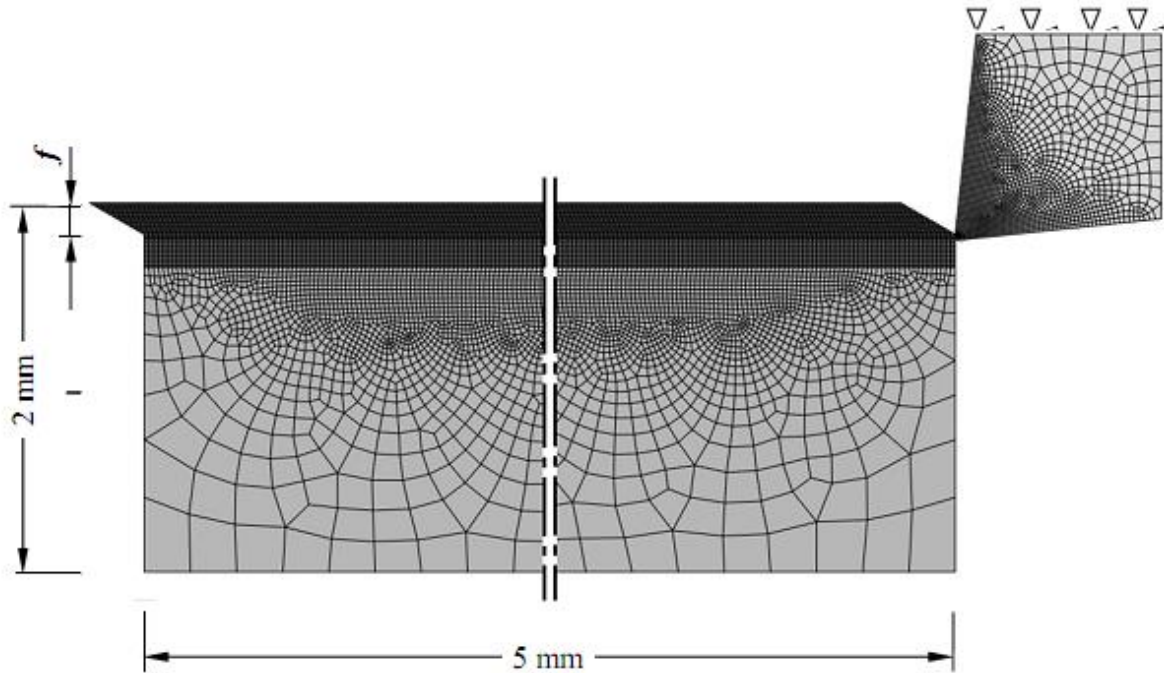
Çizelge 4. Kesme koşulları (Cutting conditions)

Deney no	Kesme hızı, V_c (mm/s)	İlerleme, f (mm/dev)	Kesme derinliği, a (mm)
1	4333.3	0.2	0.5
2	4333.3	0.8	0.5
3	4333.3	0.45	0.95

2.3. Eleman ve Ağ Yapısı Tipi (Element and Meshing Type)

Isıl-mekanik dik kesme süreci için düzlemsel şekil değiştirme analizi ALE formülasyonlu dört düğüm noktasına ve dörtgen geometriye sahip CPE4RT eleman tipi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kesici takım, ilerleme yüzü algoritması ile birlikte serbest ağ yapısı tekniği kullanılarak elemanlara bölünmüştür. Talaş katmanı ise, düzenli ağ yapısı



Şekil 1. Lagrangian sınır koşullu ALE yaklaşımı için sonlu eleman modeli (Finite element model for ALE approach with Lagrangian boundary condition)

geometrisi büyük bir etkiye sahip olup, 20 µm uç

tekniki ile elemanlara ayrılmıştır. 0.2 mm/dev ilerleme hızı için talaş katmanı kesme yönünde 100 elemana

sahip 8 alt katmandan oluşmaktadır. 0.45 mm/dev ve 0.8 mm/dev ilerleme hızları için talaş katmanı sırasıyla 18 ve 32 alt katmana sahiptir. Hesaplama zamanını azaltmak için bu katmandan aşağıya doğru gittikçe artan eleman boyutu tercih edilmiştir ve sonlu eleman ağını oluşturmak için ilerleme yüzü algoritması ile birlikte serbest ağ yapısı tekniği kullanılmıştır.

2.4. ALE Uyarlamalı Ağ Yapısı (ALE Adaptive Meshing)

ALE uyarlamalı ağ yapısı, sonlu eleman ağ hareketinin iş parçası malzemesi deformasyonundan bağımsız olduğu sonlu eleman modeli oluşturmak için uygulanır. Bu çalışmada, ALE uyarlamalı ağ bölgesi tüm iş parçası malzemesini seçerek oluşturulmuştur. Yeniden sonlu eleman ağı oluşturmak için frekans 100 alınmıştır. Her bir artıştaki yeniden ağ oluşturma süpürmesi ve başlangıç süpürme değeri 5 olarak seçilmiştir.

Uyarlamalı ağın çeşitli yönlerini ve uyarlamalı ağ bölgesine uygulanan iletim algoritmalarını kontrol etmek için ALE uyarlamalı ağ kontrolü kullanılmıştır. Bu özellik uyarlamalı ağ seçeneği ile birlikte uygulanmıştır. Ağ düzleştirilmesi elemanların distorsiyonunu azaltmak için kullanılan geometriye dayalı algoritma ile birlikte hacim, laplas ve eşpotansiyel düzleştirme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu üç yöntem için ağırlık faktörlerini belirlemek çok önemli olup, mevcut modelde hacim, laplas ve eşpotansiyel düzleştirme için ağırlık faktörleri sırasıyla 0.8, 0.1 ve 0.1 alınmıştır. Eleman bozulmasını azaltmak için uyarlamalı ağ düzleştirme tekniğine dayalı en-boy oranı geliştirme tekniği uygulanmıştır. Model Lagrangian sınır koşuluna sahip olduğu için çok büyük deformasyona maruz kalmaktadır. Bu yüzden, malzeme hareketini dikkate alan güncel düğüm noktası konumlarına dayalı ağ süpürmesi kullanılmıştır.

Her bir iletim süpürmesinde eleman ve malzeme durum değişkenleri eski ağdan yeni ağa aktarılacak zorundadır. Değişkenlerin sayısı malzeme modeline ve eleman formülasyonuna bağlı olup, gerilme, yoğunluk ve iç enerji çözüm değişkenleridir. Uyarlamalı ağ ya da iletim adımından sonra yeniden ağ oluşturma için ikinci derece yöntemi uygulanmıştır. Momentum iletimi için en az sayısal işlem ve iki boyutta iki değişken gerektiren eleman merkezi izdüşüm yöntemi kullanılmıştır.

Uyarlamalı ağ kısıtlamaları ağ hareketi üzerindeki kontrolü sağlamaktadır ve herhangi bir sınır koşulu ya da malzemeye uygulanan yüklerden bağımsız hareket etmektedir. Burada uyarlamalı ağ düğüm noktaları sınırlandırılmıştır ve malzeme ile birlikte akmaktadır.

2.5. Temas Çifti Modelleme (Modeling Contact Pair)

Takım-iş parçası temas çiftinin yanı sıra takım-talaş ara yüzündeki mekanik teması tanımlamak için yüzey-yüzey temas koşulu kullanılmıştır. Temas problemlerini çözmek için penaltı ve kinematik algoritmaları yaygın olarak kullanılır. Temas koşulu, penaltı yaklaşımında tam olarak yerine getirilemez. Bu çalışmada, mekanik

kısıtlamaları modellemek için kinematik temas algoritması kullanılmıştır.

Temas yüzeylerinin teğetsel davranışını tanımlamak için 0.4 sürtünme katsayısına sahip penaltı yöntemi kullanılmıştır [5]. Bu yöntem, yüzeylerin izafi hareketine müsaade etmektedir ve aşağıda ifade edilen Coulomb sürtünme modeline dayalıdır:

$$\tau = \mu \sigma \quad (2)$$

burada τ sürtünme kayma gerilmesi, μ sürtünme katsayısı ve σ normal gerilmedir. Bu sürtünme yasası temas ara yüzüne teğet kayma gerilmesi (τ) kritik sürtünme kayma gerilmesine (τ_c) ulaştığında temas noktasında izafi hareketin oluşacağını belirtmektedir. Bu çalışmada, kritik kayma gerilmesi değeri iş parçası malzemesinin akma gerilmesine eşit alınmış olup, 210 MPa'dır. Yapışma yüzeyinin küçük bir kısmını belirleyerek elastik kaymayı da kontrol etmek mümkündür. Burada kayma toleransı 0.005 olarak alınmıştır. En yüksek elastik kayma rijitliği 200 MPa eşittir ve bu değer normal rijitlik değerinden biraz düşüktür [5]. Ayrıca, mekanik temas analizinde yüzeylerin hareketini yöneten normal davranış sert temas olarak modellenmiştir.

2.6. Hasar Başlatma Kriteri (Damage Initiation Criterion)

Talaş kaldırma benzetimlerinde takım ucunda küçük bir bölgede meydana gelen gerilmeler ve şekil değiştirmeler hasar başlatma kriterini sağladığında iş parçası malzemesi şekil değiştirmeye ve talaşlar oluşmaya başlamaktadır. Bu çalışmada, sünek hasar başlatma kriteri kullanılmıştır. Bu kriter göre, kayma şekil değiştirme değeri kritik plastik şekil değiştirme değerine ulaştığında talaş ayrılması meydana gelmektedir. Burada hasar başlamasını yönetmek için kullanılan kritik plastik şekil değiştirme değeri (ϵ_p) 1.5 dir [5].

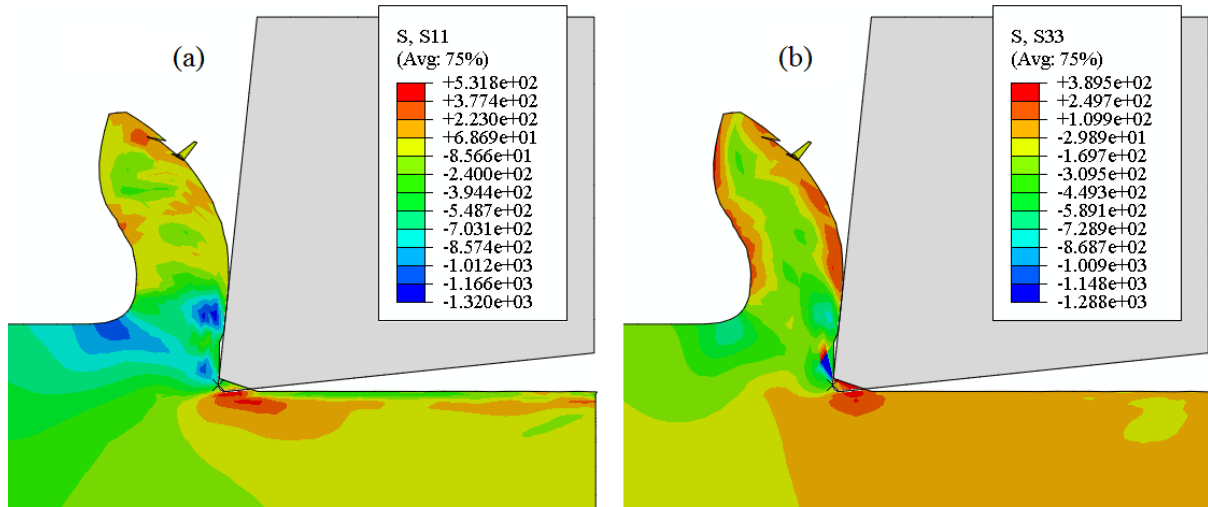
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada, Lagrangian sınırlarına sahip ALE yaklaşımı kullanılarak dik kesme sürecinin iki boyutlu sonlu eleman benzetimleri yapılmıştır. Sonlu eleman benzetimleri kesme, kesici takımı iş parçası üzerinden geri çekme ve iş parçası sıcaklığını oda sıcaklığına soğutma olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Talaş kaldırma sürecinin daha gerçekçi bir şekilde benzetimini yapmak için talaş geometrisi önceden tanımlanmamıştır. Sonlu eleman benzetimlerinden elde edilen kalıcı gerilme değerleri literatürde mevcut deneysel sonuçlarla [5] da karşılaştırılmıştır.

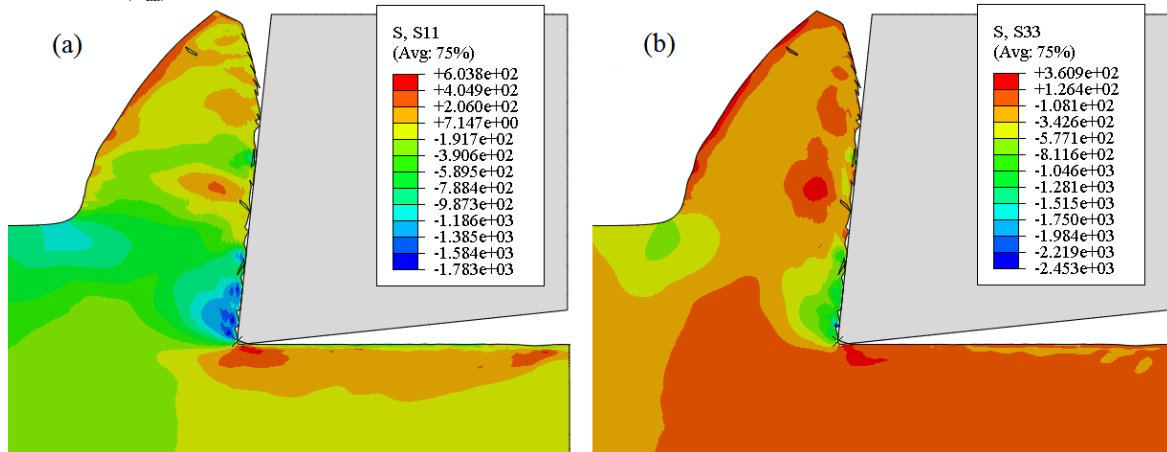
Şekil 2, 3 ve 4 iş parçası yüzeyinde ve işlenen yüzey altında tahmin edilen teğetsel gerilme (σ_{xx}) ve eksenel gerilme (σ_{zz}) bileşenlerinin alanlarını göstermektedir. Talaş kaldırma sürecinin bu benzetim sonuçlarından kesici takım uç kısmında yüksek gerilme bölgesinin meydana geldiği sonucu çıkarılabilir. Şekil 2'de görüldüğü gibi, 0.2 mm/dev ilerleme miktarında tahmin

edilen en yüksek teğetsel gerilme (σ_{xx}) ve eksenel gerilme (σ_{zz}) bileşenleri sırasıyla 531.8 MPa ve 389.5 MPa olarak bulunmuştur. İlerleme miktarı 0.8

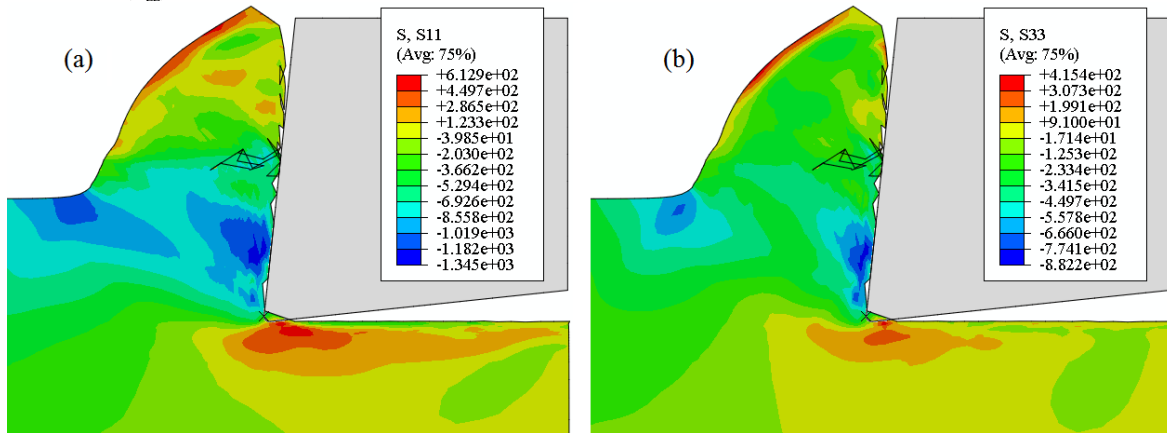
mm/dev'e arttırıldığında meydana gelen en yüksek teğetsel gerilme (σ_{xx}) 603.8 MPa ve eksenel gerilme (σ_{zz}) 360.9 MPa'dır (Şekil 3). Bu sebeple, ilerleme



Şekil 2. Denei 1 için tahmin edilen σ_{xx} ve σ_{zz} gerilme bileşenlerinin alanları: (a) teğetsel gerilme (σ_{xx}); (b) eksenel gerilme (σ_{zz}) (The fields of stress components σ_{xx} and σ_{zz} estimated for experiment 1: (a) tangential stress (σ_{xx}); (b) axial stress (σ_{zz}))



Şekil 3. Denei 2 için tahmin edilen σ_{xx} ve σ_{zz} gerilme bileşenlerinin alanları: (a) teğetsel gerilme (σ_{xx}); (b) eksenel gerilme (σ_{zz}) (The fields of stress components σ_{xx} and σ_{zz} estimated for experiment 2: (a) tangential stress (σ_{xx}); (b) axial stress (σ_{zz}))

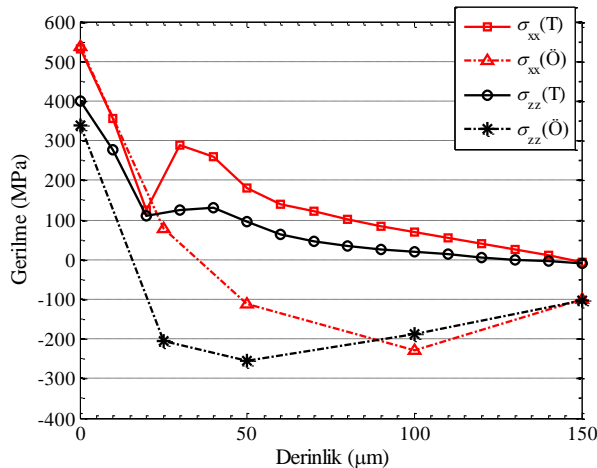


Şekil 4. Denei 3 için tahmin edilen σ_{xx} ve σ_{zz} gerilme bileşenlerinin alanları: (a) teğetsel gerilme (σ_{xx}); (b) eksenel gerilme (σ_{zz}) (The fields of stress components σ_{xx} and σ_{zz} estimated for experiment 3: (a) tangential stress (σ_{xx}); (b) axial stress (σ_{zz}))

miktarı işlenen yüzeyde oluşan kalıcı gerilmeler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

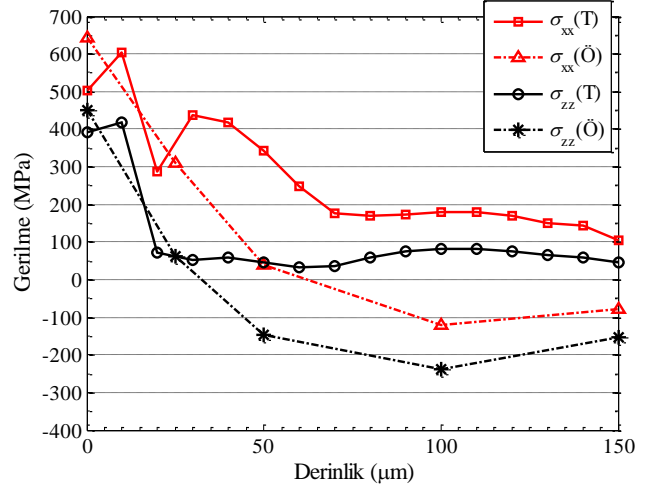
Talaş kaldırma sonucunda ortaya çıkan gerilme alanlarından işlenen yüzeyin altındaki derinlik boyunca kalıcı gerilmelerin değişimleri de elde edilmiştir. Bu değişimler kesici takım iş parçasından ayrıldıktan sonra belirlenmiştir. Benzetimlerden verileri almak için kalıcı gerilmeler yüzeyden 150 μm derinliğe kadar teğetsel (σ_{xx}) ve eksenel (σ_{zz}) yönde bulunmuştur. Şekil 5, 6 ve 7 iş parçası soğutulduğunda ve gerilme dindirildiğinde tahmin edilen ve deneysel olarak ölçülen [5] kalıcı gerilme bileşenlerini göstermektedir. Şekillerde $\sigma_{xx}(\ddot{O})$ ve $\sigma_{zz}(\ddot{O})$ ölçülen gerilme bileşenlerini ve $\sigma_{xx}(T)$ ve $\sigma_{zz}(T)$ tahmin edilen gerilme bileşenlerini göstermektedir. Kalıcı gerilmeler işlenen yüzey katmanında çekme gerilmesi yönündedir. 20NiCrMo5 çeliği için benzetimlerden elde edilen sonuçlar literatürden alınan deneysel verilerle karşılaştırıldığında, tahmin edilen kalıcı gerilme dağılımları ve ölçümler sonucunda elde edilen gerilme profillerinin birbirine benzediği görülmüştür.

Şekil 5'de görüldüğü gibi, 0.2 mm/dev ilerleme hızı ve 0.5 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilen deney 1'de takım iş parçası üzerinden geri çekildiğinde ve iş parçası oda sıcaklığına soğutulduğunda işlenen yüzeyde tahmin edilen teğetsel kalıcı gerilme ($\sigma_{xx}(T)$) 530.137 MPa ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ($\sigma_{xx}(\ddot{O})$) 538 MPa'dır. İşlenen yüzeyde tahmin edilen eksenel kalıcı gerilme ($\sigma_{zz}(T)$) 400.423 MPa ve ölçülen eksenel kalıcı gerilme ($\sigma_{zz}(\ddot{O})$) 337 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme (σ_{xx}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata yaklaşık %1.5'dir. Eksenel kalıcı gerilme (σ_{zz}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata ise %20'den daha azdır. İşlenen yüzeyde oluşan gerilme değerlerinin birbirine yakın olduğu sonucu çıkarılabilir. Hem tahmin edilen hem de ölçülen teğetsel gerilme (σ_{xx}) ve eksenel gerilme (σ_{zz}) büyüklükleri işlenen yüzeyde çekme gerilmesi yönündedir. Tahmin edilen ve deneysel olarak bulunan işlenen yüzeydeki teğetsel kalıcı gerilme (σ_{xx}) değerleri kesici takımın kesme yönündeki kayma hareketinden dolayı eksenel gerilme (σ_{zz}) sonuçlarından daha yüksektir.



Şekil 5. 20NiCrMo5 çeliğinin dik kesme işleminde tahmin edilen ve ölçülen gerilme değişimlerinin karşılaştırması (Deney 1) (Comparison of the estimated and measured stress variations in orthogonal cutting process of 20NiCrMo5 steel (Experiment 1))

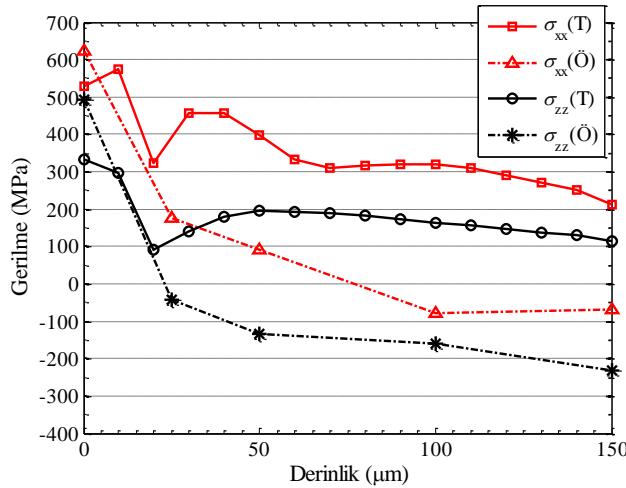
Şekil 6'da görüldüğü gibi, 0.8 mm/dev ilerleme hızı ve 0.5 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilen deney 2'de takım iş parçası üzerinden geri çekildiğinde ve iş parçası oda sıcaklığına soğutulduğunda tahmin edilen teğetsel kalıcı gerilme ($\sigma_{xx}(T)$) ve eksenel kalıcı gerilme ($\sigma_{zz}(T)$) dağılımları tamamen çekme gerilmesi yönündedir. Ancak, ölçülen teğetsel gerilme ($\sigma_{xx}(\ddot{O})$) ve eksenel gerilme ($\sigma_{zz}(\ddot{O})$) profilleri büyük ölçüde basma gerilmesi özelliği taşımaktadır. Bu fark, işlenen yüzeyden aşağıya doğru inildikçe doğru kalıcı gerilme değerlerini ölçmenin oldukça zor olmasıyla açıklanabilir. İşlenen yüzeyde tahmin edilen teğetsel kalıcı gerilme ($\sigma_{xx}(T)$) 503.849 MPa ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ($\sigma_{xx}(\ddot{O})$) 643.1 MPa'dır. İşlenen yüzeyde tahmin edilen eksenel kalıcı gerilme ($\sigma_{zz}(T)$) 392.74 MPa ve ölçülen eksenel kalıcı gerilme ($\sigma_{zz}(\ddot{O})$) 451.6 MPa olarak bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlara göre, tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme (σ_{xx}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata yaklaşık %20'dir. Eksenel kalıcı gerilme (σ_{zz}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata ise %15'den daha azdır. Ayrıca, deney 1'de görüldüğü gibi, hem tahmin edilen hem de ölçülen yüzeydeki teğetsel kalıcı gerilme (σ_{xx}) değerleri eksenel gerilme (σ_{zz}) sonuçlarından daha büyüktür.



Şekil 6. 20NiCrMo5 çeliğinin dik kesme işleminde tahmin edilen ve ölçülen gerilme değişimlerinin karşılaştırması (Deney 2) (Comparison of the estimated and measured stress variations in orthogonal cutting process of 20NiCrMo5 steel (Experiment 2))

Şekil 7'de görüldüğü gibi, 0.45 mm/dev ilerleme hızı ve 0.95 mm kesme derinliğinde gerçekleştirilen benzetimden tahmin edilen teğetsel gerilme ($\sigma_{xx}(T)$) ve eksenel gerilme ($\sigma_{zz}(T)$) büyüklükleri 150 μm derinlik boyunca çekme gerilmesi özelliği göstermiştir. Deneysel olarak belirlenen teğetsel gerilme ($\sigma_{xx}(\ddot{O})$)

dağılımı yaklaşık 75 μm 'dan daha küçük derinlikler için çekme gerilmesi yönünde olup, 75 μm 'dan daha büyük derinlikler için basma gerilmesi özelliği sergilemiştir. Ölçümler sonucunda bulunan aksel gerilme ($\sigma_{zz}(\ddot{O})$) dağılımı ise daha fazla basma gerilmesi özelliğine sahiptir. Tahmin edilen ve ölçülen gerilme dağılımları arasındaki fark, yukarıda da açıklandığı gibi, deneysel olarak gerilme büyüklüklerinin ölçülmesinin zor olmasına bağlanabilir. İşlenen yüzeyde tahmin edilen teğetsel kalıcı gerilme ($\sigma_{xx}(T)$) 529.993 MPa ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme ($\sigma_{xx}(\ddot{O})$) 624.1 MPa olarak bulunmuştur. İşlenen yüzeyde tahmin edilen aksel kalıcı gerilme ($\sigma_{zz}(T)$) 333.9 MPa ve ölçülen aksel kalıcı gerilme ($\sigma_{zz}(\ddot{O})$) 491.2 MPa'dır. Elde edilen bu sonuçlara göre, tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme (σ_{xx}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata yaklaşık %15'dir. Aksel kalıcı gerilme (σ_{zz}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata ise %35'den daha azdır. Ölçülen yüzeydeki teğetsel kalıcı gerilme (σ_{xx}) büyüklükleri aksel gerilme (σ_{zz}) değerlerinden daha büyüktür.



Şekil 7. 20NiCrMo5 çeliğinin dik kesme işleminde tahmin edilen ve ölçülen gerilme değişimlerinin karşılaştırması (Deney 3) (Comparison of the estimated and measured stress variations in orthogonal cutting process of 20NiCrMo5 steel (Experiment 3))

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Talaş kaldırma işlemlerinde işlenen yüzeyin altındaki farklı malzeme katmanları arasındaki plastik şekil değiştirmeler iş parçasında kalıcı gerilmelere yol açmaktadır. Bu çalışmada, iş parçası kalıcı gerilmelerini belirlemek için pinyon dişlilerin yapımında kullanılan 20NiCrMo5 çeliğinin talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman analizi yapılmıştır. Talaş kaldırma sürecinin sonlu eleman benzetimi için uyarlmalı ağ yapısına sahip Arbitrary Lagrangian Eulerian yöntemi kullanılmıştır. Talaş kaldırma süreci sonucunda kesici takım uç kısmında yüksek gerilme bölgesinin mevcut olduğu ve işlenen yüzeyde oluşan gerilme büyüklüklerinin çekme gerilmesi özelliği taşıdığı tespit

edilmiştir. İş parçası yüzeyinde ve işlenen yüzey altında tahmin edilen gerilme büyüklükleri literatürden elde edilen deneysel sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. 0.5 mm sabit kesme derinliğinde 0.2 mm/dev ve 0.8 mm/dev ilerleme hızları için işlenen yüzeyde tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme (σ_{xx}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hatalar sırasıyla yaklaşık %1.5 ve %20'dir. 0.2 mm/dev ve 0.8 mm/dev ilerleme hızları için işlenen yüzeyde tahmin edilen ve ölçülen aksel kalıcı gerilme (σ_{zz}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hatalar sırasıyla %20 ve %15'den daha az olarak bulunmuştur. 0.95 mm kesme derinliği ve 0.45 mm/dev ilerleme hızında işlenen yüzeyde tahmin edilen ve ölçülen teğetsel kalıcı gerilme (σ_{xx}) değerleri arasındaki mutlak yüzde hata yaklaşık %15 olup, aksel kalıcı gerilme (σ_{zz}) değerleri arasındaki mutlak yüzde %35'den daha azdır. Talaş kaldırma benzetimlerinden elde edilen teğetsel kalıcı gerilmeler (σ_{xx}) süreç parametrelerinin eniyilemesi için kullanılabilir. Tahmin edilen ve ölçümler sonucunda bulunan kalıcı gerilme dağılımları benzer bir değişim göstermiştir. Ancak, işlenen yüzeyden aşağıya doğru gidildikçe benzetim sonuçları ile deneysel sonuçların tam olarak eşleşmediği ortaya çıkmıştır. Bu durum, derinlik arttıkça deneysel olarak doğru kalıcı gerilmelerin ölçülmesinin zor olmasına bağlanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Liang S.Y. and Su J.-C., "Residual stress modeling in orthogonal machining", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56: 65–68, (2007).
- Ulutan D., Alaca B.E. and Lazoglu İ., "Analytical modelling of residual stresses in machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 183: 77–87, (2007).
- Özel T. and Zeren E., "Finite element modeling the influence of edge roundness on the stress and temperature fields induced by high-speed machining", *The international journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35: 255–267, (2007).
- Stenberg N. and Proudiana J., Numerical modelling of turning to find residual stresses, *Procedia CIRP*, 8: 258–264, (2013).
- Prasad C.S., "FEM modeling to verify residual stress in orthogonal machining", *Lap Lambert Academic Publishing*, Saarbrücken, Deutschland, (2010).
- Shih A.J. and Yang H.T.Y., "Experimental and finite element predictions of the residual stresses due to orthogonal metal cutting", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 36: 1487–1507, (1993).
- Tekaslan Ö., Gerger N. ve Şeker U., "AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin farklı kesme parametreleri ile tornalama işleminden sonra oluşan kalıcı gerilmelerin araştırılması", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24: 443–452, (2009).
- Shet C. and Deng X., "Residual stresses and strains in orthogonal metal cutting", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43: 573–587, (2003).

9. Salio M., Berruti T. and Poli G., "Prediction of residual stress distribution after turning in turbine disks", *International Journal of Mechanical Sciences*, 48: 976–984, (2006).
10. Miguélez M.H., Zaera R., Molinari A., Cheriguene R. and Rusinek A., "Residual stresses in orthogonal cutting of metals: The effect of thermomechanical coupling parameters and of friction", *Journal of Thermal Stresses*, 32: 269–289, (2009).
11. Liu C.R. and Guo Y.B., "Finite element analysis of the effect of sequential cuts and tool-chip friction on residual stresses in a machined layer", *International Journal of Mechanical Science*, 42: 1069–1086, (2000).
12. Guo Y.B. and Liu C.R., "FEM analysis of mechanical state on sequentially machined surfaces", *Machining Science and Technology*, 6: 21–41, (2002).
13. Vaz M. Jr, Owen D.J.R., Kalhori V., Lundblad M. and Lindgren L.-E., "Modelling and simulation of machining processes", *Archives of Computational Methods in Engineering* 14: 173–204, (2007).
14. Adetoro M.B. and Wen P.H., "Simulation of end milling on FEM using ALE formulation", *Abaqus User's Conference*, New Port, Rhode Island, USA, 1–19, (2008).
15. Johnson G.R. and Cook W.H., "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", *Proc. of the 7th International Symposium on Ballistics*, The Hague, The Netherlands, 541–547, (1983).

A New Sweep Up /Down Phenomenon between the Chaotic and Regular Regions in a New R2L2D Circuit*

*The short version of that study was presented in ICEMIS 2015- International Conference on Engineering & MIS.

Erol KURT¹, Cihan BİNGÖL²

¹Gazi University, Technology Faculty, Electrical and Electronics Engineering Department

²Gazi university, Institute of Sciences, Electrical and Electronics Engineering Department

(Geliş / Received : 18.11.2015 ; Kabul / Accepted : 15.12.2015)

ABSTRACT

R2L2D circuit becomes a chaotic circuit at certain frequencies and amplitudes. In the present study, new and strange phenomena, which is encountered in a newly-developed circuit, namely R2L2D circuit is reported. This new phenomena, which we called as the "sweep up/down effect" has been observed when the successive dynamic responses of the circuit have been explored by only adjusting the peak-to-peak amplitudes V_{pp} at a constant feeding frequency, namely $f = 65 \text{ kHz}$. In one of our recent paper [13], this new circuit has been explored for a wide feeding amplitude and frequency regimes, whereas this effect has not been recognized at that time due to the lack of sensitivity. However, the detailed observations prove that the sweep up/down effect governs the identification of the dynamics in terms of periodic and chaotic regimes. Thus it gives a kind of uncertainty region at the threshold of the regimes depending on the feeding voltage increase or decrease. Besides, for a certain system parameter, i.e. V_{pp} , the chaotic and periodic region co-exists phenomenologically. This effect becomes vital for the synchronization and encryption studies in the sense that the decrease/increase in amplitude certainly yield to regular or chaotic behavior in the output. In addition, the transitions from regular regime to the chaotic one or vice-verse takes place without any period doubling procedure apart from the traditional observations.

Keywords: sweep up, sweep down, regular, chaotic, RLD circuit

Yeni R2L2D Devresinde Kaotik ve Düzenli Bölgeler Arasında Yeni Bir Yukarı/Aşağı Geçiş Olgusu*

*Bu çalışmanın kısa formu ICEMIS 2015- International Conference on Engineering & MIS konferansında sunulmuştur.

ÖZ

R2L2D devresi belirli frekans ve genliklerde kaotik devreye dönüşür. Bu çalışmada, yeni geliştirilen bir devrede yani R2L2D devresinde karşılaşılan yeni ve ilginç bir olguyu sunmaktayız. "Frekans yukarı/aşağı geçiş etkisi" olarak adlandırdığımız bu olgu, sabit besleme frekansında yani $f = 65 \text{ kHz}$ de sadece tepe-tepe gerilimleri V_{pp} ayarlanarak devrenin peşpeşe dinamik tepkileri araştırıldığında gözlemlenmiştir. Son çalışmalarımızdan birinde [13], bu yeni devre geniş bir besleme gerilimi ve frekans rejimleri için araştırılmış; ancak bu olgu, hassasiyet eksikliğinden dolayı o zaman gözlemlenememişti. Ancak, ayrıntılı gözlemler göstermektedir ki; frekans yukarı/aşağı geçiş etkisi, periyodik ve kaotik rejimler açısından dinamiğin belirlenmesinde büyük rol oynamaktadır. Bu nedenle, besleme geriliminin artış ya da azalışına bağlı olarak rejimlerin eşliğinde bir tür belirsizlik bölgesi bulunduğu doğrulanmıştır. Ayrıca belli bir sistem parametresi yani V_{pp} için kaotik ve periyodik bölgelerin, fenomenolojik olarak bir arada bulunduğu anlaşılmıştır. Bu etki, genlikte artış azalışın hiç şüphesiz çıkışta düzenli ya da kaotik davranışı sağlaması bağlamında senkronizasyon ve şifreleme çalışmaları için hayati olmaktadır. İlaveten; düzenli rejimden kaotik rejime ya da tersine geçişler geleneksel gözlemler dışında herhangi bir periyot katlama olmaksızın meydana gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: yukarı geçiş, aşağı geçiş, düzenli, kaotik, RLD devresi

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Nonlinear electrical circuits are of great interest due to their wide application areas in engineering and natural sciences [1-8]. A great research, both theoretical and experimental has been performed on nonlinear

electronic circuits because the nonlinear circuits provide a convenient framework for undertaking a systematic exploration of mechanisms underlying the onset of chaos [9]. While the researchers mainly focus on the encryption, signal masking and synchronization studies, another motivation comes from the understanding of chaos phenomena in this manner [5-12]. Following the invention of chaos in the basic electrical circuit RLD by Linsay [12], the generation of

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: ekurt@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 305-310

the chaotic behavior in those circuits have been a popular research topic [13,14,15]. Historically, the first observations of Linsay [12] and Testa [14] on the RLD circuit proved that a certain periodic steady state behavior with the same period as the voltage source occurs as long as the source amplitude V is sufficiently small. However, if a certain feeding amplitude V is adjusted to the input, the actual period of the steady state periodic output doubles. Thus for V values, just above the critical voltage, the output voltage over the resistor indicates a $1/2$ subharmonic, so called "bifurcation". When V is increased further, an entire sequence of period-doubling bifurcations have been observed such as $1/4$, $1/8$, $1/16$ subharmonics. At the end of certain bifurcations, the previous steady state cannot be observed anymore. In fact, the output signals are chaotic except for some small transient periodic regimes. The odd subharmonics have also been observed for increasing V in this circuit [12,14]. Azzouz et al carried out a theoretical exploration on the same circuit for the identification of the subharmonic features [16]. They modeled the diode as a varactor diode and observed even and odd subharmonics. They also emphasized the effect of nonlinear diode capacitance rather than the effect of sharp delay [16]. There exist a number of different studies realized with this circuitry in order to shed a light on the route to chaos in terms of the successive bifurcations, which take place just before the chaotic regime [17-20]. In addition, the ordinary RLD circuit has been considered a good circuitry for the determination of so-called "Feigenbaum parameters", which explains a universal recurrence relation of the trajectories in the bifurcation map [14-18]. It was proved that the bifurcation map obtained from the RLD circuit exhibits an ideal cycle with the *Feigenbaum parameter* = 4.669.

The RLD circuit has been used for both the determination of bifurcation and the quasi-periodicity [18-20]. From the point of time series analysis, some remarkable studies on the output voltages of the RLD circuit have been carried out. For instance, one author of this paper used a statistical test to evaluate the nonlinear responses of the RLD circuit by introducing an embedding dimension [21-22]. Thereby a classification of the output signals was realized in a statistical manner.

Although different orientations of RLD circuits have been studied in the recent years [13,23,24], there is not any report on the sweep up/down effect, where the voltage increase/decrease direction (i.e. sweep up/down) affects the dynamic regime. Besides, a sudden transition occurs between the chaotic and periodic regimes in the present circuitry.

In one of our recent paper [13], the dynamic behavior of the forward and reversed biased diode systems (i.e. R2L2D circuit) have been discussed for a wide parametric region (i.e. on the $V - f$ plane) with less sensitive internal. In the same study, a bifurcation analysis based on the manifold theory has also been

presented in order to determine the bifurcation characteristics on the route to chaos in R2L2D circuit.

In the same paper, the importance of the input signal frequency f and the resistor R is also emphasized for the bifurcation map of the system and a wider chaotic region has been observed in the new circuitry compared to the traditional RLD circuit starting from $f = 40$ kHz, when the appropriate V is adjusted from the input. However the phenomenon reported in the present paper has not been recognized in previous study due to the lack of sufficient sensitivity.

The paper is organized as follows: Section 2 briefly describes the proposed circuit and presents the experimental details for the observation of the observed phenomenon. The main experimental results are discussed in Section 3. Finally the paper ends with a brief conclusion on the main findings.

2. R2L2D CIRCUIT (R2L2D DEVRESİ)

2.1. Theoretical Background (Teorik Arkaplan)

The proposed R-2L-2D circuit is shown in Fig. 1. The voltage equality of the circuit can be stated as follows:

$$V_R + V_{LD} = V, \tag{1}$$

where V_{LD} denotes the voltage over the inductor and diode. As seen in Fig. 1., the diodes are inversely attached to the inductors in each branch. While current I from the main branch is divided into I_1 and I_2 on each branch, the negative and positive alternates of the sinusoidal voltage pass through the branches over the entire period.

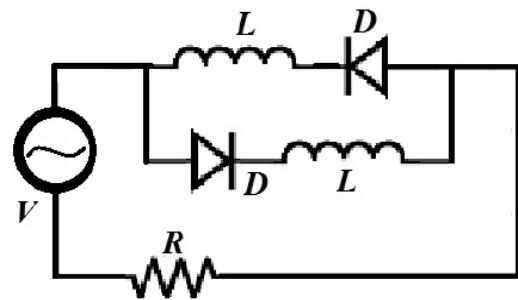


Figure 1. The R2L2D circuit with input voltage $V = V_0 \sin(\omega t)$ ($V = V_0 \sin(\omega t)$ giriş gerilimi ile R2L2D Devresi)

Therefore,

$$V_{LD} = V_{D1} + L \frac{di_1}{dt} \tag{2}$$

$$V_{LD} = V_{D2} - L \frac{di_2}{dt}$$

can be written. Considering Fig.1 and the equations above, one arrives at

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{V_{D1}}{L} + \frac{V}{L} \sin(\omega t) - \frac{R}{L} (I_1 + I_2) \\ \frac{di_2}{dt} &= \frac{V_{D2}}{L} + \frac{V}{L} \sin(\omega t) - \frac{R}{L} (I_1 + I_2) \end{aligned} \tag{3}$$

Here I_1 and I_2 denote the branch currents and $I = I_1 + I_2$ is valid. Note that V_{D1} and V_{D2} are used for the voltages over the diodes. Strictly speaking they can be written as,

$$V_{D1} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_1}{I_S} + 1\right) \quad (4)$$

$$V_{D2} = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{I_2}{I_S} + 1\right)$$

so that the nonlinear behavior of the diodes is important for the dynamics of the circuits [13]. Here a saturation current term I_S is also included as a characteristic feature of the diode (i.e. $I_S = 2.55 \text{ nA}$ for 1N4007 diode). The dimensionless form of the equation system can be written as,

$$\frac{dI_1}{dt'} = \frac{kT}{eL} \ln\left(\frac{I_1}{I_S} + 1\right) + \frac{V}{L} \sin(\Omega t') - \frac{R}{L} (I_1 + I_2) \quad (5)$$

$$\frac{dI_2}{dt'} = \frac{kT}{eL} \ln\left(\frac{I_2}{I_S} + 1\right) + \frac{V}{L} \sin(\Omega t') - \frac{R}{L} (I_1 + I_2)$$

Here time scaling $t' = \tau t$ can be considered and τ is determined by the circuit elements characteristics such as $\tau = L/R$. Here, τ represents the natural period of the circuit and it cannot be related to the period of applied voltage V . In addition $\Omega = \omega / \tau = \omega R / L$.

2.2. Experimental Background (Deneyisel Arkaplan)

The experimental setup has been constructed according to Fig. 1. The resistance and the inductor values are $R=1\text{k}\Omega$ and $L=10\text{mH}$, respectively. 1N4007 diodes are used in the experiments. The circuit has been driven by a GW Instek AFG-2125 function generator by supplying a sinusoidal feeding with an adjustable frequency f and an amplitude V . For the circuit measurements and phase space observations, a Kenwood DCS-7020 oscilloscope has been used.

In the proposed circuit, the diodes become parallel to each other. Thus, while the current passes through one of the diodes in one direction, the other one does not allow the current. The current always flows through one of the diodes for any f values. This situation causes a finite voltage on R for the entire period of the circuit with the influence of voltage V_{LD} . Besides, the period doubling can also be observed while different V and f values have been applied to the circuit input.

During the parameter scan, a number of period doubling behaviors have been observed as in the ordinary RLD circuit. For this specific observation, the voltage increment step is adjusted to $\Delta V = 0.001 \text{ V}$ and the frequency has been kept constant to some values such as $f = 60 \text{ kHz}$, $f = 65 \text{ kHz}$ and $f = 80 \text{ kHz}$ to give better sensitivity on the input voltage exploration in the present paper. However the behavior for entire $V - f$ plane can be obtained from Ref. [13] for lower resolution.

3. RESULTS AND DISCUSSION (SONUÇLAR VE TARTIŞMA)

Initially, the chaotic signals can be obtained at a specific frequency and voltage. For instance, a signal with chaotic regime has been obtained as shown in Fig. 2. The signal always changes in frequency and amplitude, when time passes. When another input amplitude / frequency is applied, the chaotic signal changes in amplitude. In addition, it yields to a broad frequency spectra at the vicinity of main frequency as seen in several traces in the waveform (Fig. 3).

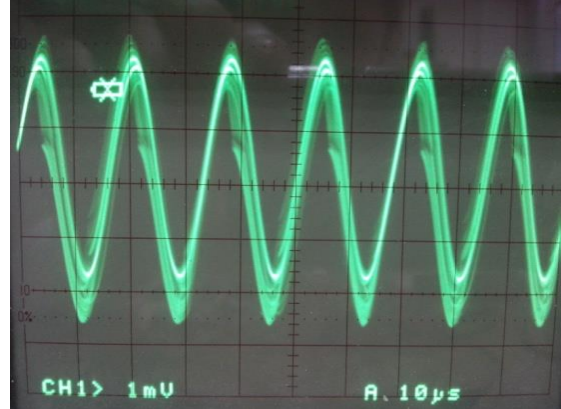


Figure 2. A chaotic signal formed attractor from the R2L2D circuit. The input parameters are $V_{pp} = 8.36 \text{ V}$ and $f = 58.4 \text{ kHz}$. (R2L2D devresinden elde edilen kaotik sinyal. Giriş parametreleri, $V_{pp} = 8.36 \text{ V}$ ve $f = 58.4 \text{ kHz}$.)

Three representative attractors from the periodic, quasi-periodic and chaotic regimes are presented in Figs. 4-6. Fig. 4 shows the characteristic periodic attractor having a "sweet package" form. Note that x and y axes are the input voltage V and voltage over R , V_R , respectively. This periodic form shows a period two (2P) regime with two trajectories.

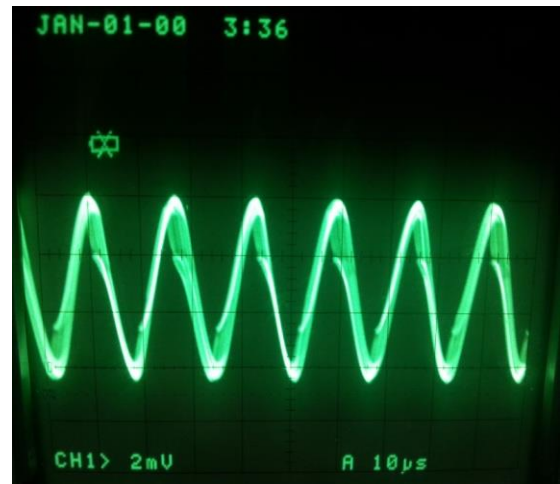


Fig. 3. A chaotic signal formed attractor from the R2L2D circuit. The input parameters are $V_{pp} = 4.010 \text{ V}$ and $f = 62 \text{ kHz}$. (R2L2D devresinden elde edilen kaotik sinyal. Giriş parametreleri, $V_{pp} = 4.010 \text{ V}$ ve $f = 62 \text{ kHz}$.)

When V is increased up to $V_{pp} = 6.47$ at the same frequency, the attractor in Fig. 5 is obtained. This attractor mainly gives a quasi-periodic regime, which appears just before the chaotic one. The trajectories change from the attractor in Fig. 4, substantially.



Figure 4. A representative "sweet package" formed attractor from the R2L2D circuit. The input parameters are $V_{pp} = 1.49$ V and $f = 60$ kHz. x and y axes are the input voltage V and voltage over R , V_R , respectively. (R2L2D devresinden elde edilen örnek bir "şeker paketi" biçimli çekici. Giriş parametreleri $V_{pp} = 1.49$ V ve $f = 60$ kHz. x ve y eksenleri sırasıyla giriş gerilimi V ve R üzerinde gerilim V_R 'dir.)

however still some trajectories can be seen clearly as the indicator of the quasi-periodic regime.

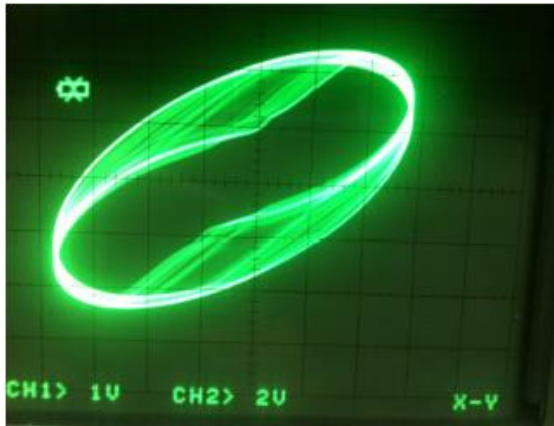


Figure 5. A representative quasi-periodic attractor from the R2L2D circuit. The input parameters are $V_{pp} = 6.47$ V and $f = 60$ kHz. x and y axes are the input voltage V and voltage over R , V_R , respectively. (R2L2D devresinden elde edilen örnek bir sözde-periyodik çekici. Giriş parametreleri $V_{pp} = 6.47$ V ve $f = 60$ kHz. x ve y eksenleri sırasıyla giriş gerilimi V ve R üzerinde gerilim V_R 'dir.)

A sample chaotic attractor can be shown in Fig. 6. This chaotic regime can be obtained for a moderate voltage and higher f values. Note especially the intense points inside the trajectories, which represent the chaotic output.

When the amplitude and frequency of the input signal are increased, another chaotic attractor is obtained as in Fig. 7. Note that that attractor has much complicated trajectories on the phase plane with higher chaoticity.

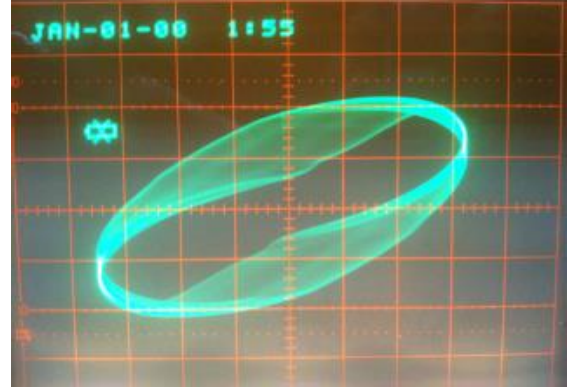


Figure 6. A chaotic attractor from the R2L2D circuit. The input parameters are $V_{pp} = 3.379$ V and $f = 80$ kHz. x and y axes are the input voltage V and voltage over R , V_R , respectively. (R2L2D devresinden elde edilen kaotik bir çekici. Giriş parametreleri $V_{pp} = 3.379$ V ve $f = 80$ kHz. x ve y eksenleri sırasıyla giriş gerilimi V ve R üzerinde gerilim V_R 'dir.)



Figure 7. A chaotic attractor from the R2L2D circuit. The input parameters are $V_{pp} = 8.16$ V and $f = 153.3$ kHz. (R2L2D devresinden elde edilen kaotik bir çekici. Giriş parametreleri $V_{pp} = 8.16$ V ve $f = 153.3$ kHz.)

After a survey among different dynamical regimes, the sweep up/down phenomenon, which is encountered in this basic circuit can be clarified in detail. Fig. 8 shows the sweep up/down effect with both the directions of voltage increase/decrease and the responses of the system.

The diagram shows various attractors at the left and right hand side of the diagram. The left column corresponds to the case where the input voltage V has been gradually increased by high sensitivity via $\Delta V = 1$ mV (i.e. sweep up). On the other hand, the right column corresponds to the case where V has been decreased (i.e. sweep down) in the same manner.

If V is increased from the value such as $V= 6.500 V$, the dynamics goes to the chaotic regime as indicated at the lower attractor of the left panel. According to the detailed analyzes, this chaotic regime survives until we arrive at $V = 7.179$. After very small interval, this regime suddenly changes to a regular one as shown in the attractor located at the top of the left panel. As one recognizes clearly from the attractor, chaos is certainly obtained for $V = 6.963 V$. When V is increased to $V = 7.180$, a sudden periodic attractor with 2P appears.

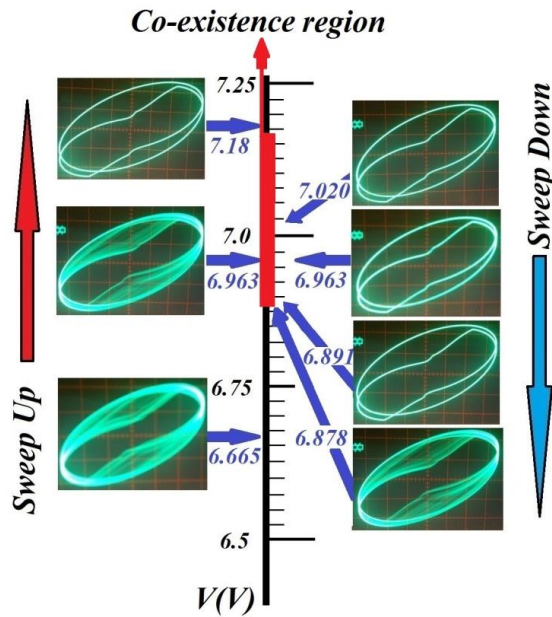


Figure 8. The sweep up/down diagram from the R2L2D circuit. The input frequency $f = 65 kHz$. x and y axes are the input voltage V and voltage over R , V_R , respectively. (R2L2D devresinden elde edilen yukarı/aşağı geçiş diyagramı. Giriş frekansı $f = 65 kHz$. x ve y eksenleri sırasıyla giriş gerilimi V ve R üzerinde gerilim V_R 'dir.)

Since we arrive at $V = 7.250 V$, the sweep down case can be adjusted to the circuit just by adjusting lower input voltages. When the voltage is gradually decreased, the periodic attractor still persists till $V=6.891 V$ as seen in the third attractor from the top at the right panel. Note that the types of the attractors are same for $V = 7.020 V$, $V=6.963 V$ and $V = 6.891 V$ according to the attractors at the top of the right panel and the second one from the top of the right panel. In fact, period 2 (2P) regime continues till $V = 6.877 V$. The chaotic regime appears suddenly at $V=6.878 V$.

Considering both sweep up and down cases, the chaotic region comes later from the value which is observed at the sweep up case. In addition, the periodic region appears for lower values (i.e. till $V = 6.891 V$) at sweep down case compared to the sweep up case, which is observed at $V = 7.180$. Thus, one can not directly say that the regime for a certain region of input voltages (for instance, $V = 6.963 V$) is chaotic or periodic. Therefore it is a co-existence point which disables one to identify

the real regime. Thereby, the direction of the voltage adjustment plays a significant role to identify the dynamic regime in the system.

Another interesting point is that the circuit indicates a sudden transition between the chaotic and periodic regimes. We believe that this sweep up/down effect and the sudden transition in this circuit may shed a light to understand the strange behavior behind chaos in order to make much efficient synchronized circuits in the future.

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

A new sweep up/down phenomenon, which has been encountered in a recently developed R2L2D circuit with double inductors and diodes has been noticed. The proposed circuit indicates a wider chaotic region compared to the traditional RLD circuit. While chaotic region is observed till $V = 7.17 V$ in the sweep up case, it appears at lower values than $V = 6.88 V$ in the sweep down case. Thus a certain region (i.e. co-existence region) with $\Delta V = 0.29 V$ wide skips between threshold of regular and chaotic regimes. This situation proves that the direction of the voltage adjustment is vital in order to determine the dynamics inside the coexistence region. This sweep up/down effect can be important issue for the synchronization and cryptography studies, where the parametric adjustment is utilized frequently.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. Kurt, E., Canturk, M. "Bifurcations and hyperchaos from a dc driven non-identical Josephson junction system", *Int. J. Bif. Chaos* 20(11): 3725-3740, (2010).
2. Kurt, E., Canturk, M. "Chaotic dynamics of resistively coupled DC-driven distinct Josephson junctions and the effects of circuit parameters", *Physica D: Nonl. Phen.* 238(22): 2229-2237, (2009).
3. Kurt, E. "Nonlinearities a non-autonomous chaotic circuit with a non-autonomous model of Chua's diode", *Phys. Scr.* 74: 22-27, (2006).
4. Kurt, E., Ozturk, M.K., Kasap, R. "Investigating the most appropriate parameters of the non-linear resistor circuit time series", *J. Inst. Sci. & Tech. Gazi Uni.* 14(4): 1261-1269, (2001).
5. Thompson, J.M.T., Bishop, S.R. *Nonlinearity and Chaos in Engineering Dynamics*, (John Wiley and Sons, UK), (1994).
6. Kennedy, M.P., Rovatti, R. Setti, G. (edited by Raton, B.) *Chaotic Electronics in Telecommunications*, (CRC Press, USA), (2000).
7. Uchida, A., Davis, P., Itaya, S. "Generation of information theoretic secure keys using a chaotic semiconductor laser", *Appl. Phys. Lett.* 83(15): 3213-3215, (2003).
8. Van Wiggeren, G.D., Roy, R. "Communication with chaotic lasers", *Science* 279, pp. 1198, (1998).
9. Kapitaniak, T. *Controlling Chaos*, (Academic Press, USA), (1996).
10. Stojanovski, T., Pihl, J., Kocarev, L. [2001] "Chaos based random number generators Part II: Practical realization",

- IEEE Trans. Circuits Systems I: Fund. Theory and Appl.* 48: 382-385, (2001).
11. Tsubone, T., Saito, T. [1998] "Hyperchaos from a 4-D manifold piecewise-linear system", *IEEE Trans. Circuits Systems I: Fund. Theory and Appl.* 45: 889-894, (1998).
 12. Linsay, P. S. [1981] "Period doubling and chaotic behaviour in a driven anharmonic oscillator", *Phys. Rev. Lett.* 47: 1349-1352, (1981).
 13. Kurt, E., Ciylan, B., Taskan, O.O., Kurt, H.H. "Bifurcation analysis of a resistor-double inductor and double diode circuit and a comparison with a resistor-inductor-diode circuit in phase space and parametrical responses", *Scientia Iranica* 21(3): 935-944, (2014).
 14. Testa, J., Perez, J., Jeffries, C. "Evidence for universal chaotic behaviour of a driven oscillator", *Phys. Rev. Lett.* 48: 714-717, (1982).
 15. Itoh, M., Chua, L.O. "Dynamics of memristor circuits", *Int. J. Bif. Chaos* 24(5): 1430015, (2014).
 16. Azzouz, A., Duhr, R., Hasler, M. "Transition to chaos in a simple nonlinear circuit driven by a sinusoidal voltage source", *IEEE Trans. Circuits Systems* 30(12): 913-914, (1983).
 17. Su, Z., Rollings, R.W., Hunt, E.R. "Universal properties at the onset of chaos in diode resonator systems", *Phys. Rev. A* 40(5): 2689-2697, (1989).
 18. van Buskirk, R., Jeffries, C. "Observation of chaotic dynamics of coupled nonlinear oscillators", *Phys. Rev. A* 31: 3332-3357, (1985).
 19. Huang, J.Y. & Kim, J.J. "Type-II intermittency in a coupled nonlinear oscillator: Experimental observation", *Phys. Rev. A* 36(3): 1495-1497, (1987).
 20. Kim, Y.H., Kim, J.J. "Observation of quasiperiodicity in a single diode circuit", *J. Korean Phys. Soc.* 27(2): 225-227, (1994).
 21. Kasap, R., Kurt, E. "Investigation of chaos in the RL-diode circuit by using the BDS test", *J. Appl. Math. Decision Sci.* 2(2): 193-199, (1998).
 22. Kurt, E., Acar, S., Kasap, R. "A comparison of chaotic circuits from a statistical approach", *Math. Comp. App. J.* 5(2): 95-103, (2000).
 23. Inaba, N., Nishio, Y., Endo "Chaos via torus breakdown from a four-dimensional autonomous oscillator with two diodes", *Physica D* 240(11): 903-912, (2011).
 24. Manimehan, I., Philominathan, P. "Composite dynamical behaviors in a simple seriesparallel LC circuit", *Chaos, Solit. Fractals* 45(12): 1501-1509, (2012).

Çok Yanıtlı Taguchi Eniyilemesine Yönelik Bir Bilgisayar Uygulamasının Geliştirilmesi

Yusuf Tansel İÇ*, Hikmet DURAN, Barış KEÇECİ, Emrehan İLİK, Berkan BİLGİÇ

Başkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Bağlıca Kampüsü,

Eskişehir Yolu 20. Km., Etimesgut, 06810, Ankara, Türkiye.

(Geliş / Received : 30.11.2015 ; Kabul / Accepted : 05.03.2016)

ÖZ

Bu çalışmada üç parametrelili ve her parametre için üç düzey bulunan, en fazla üç kalite karakteristiğine sahip herhangi bir kalite iyileştirme probleminin parametrelerinin eniyilenebileceği bir bilgisayar uygulaması geliştirilmiştir. Bilgisayar uygulaması kullanılarak, kalite karakteristiklerine etki eden faktörler ve seviyeleri tespit edildiğinde Taguchi'nin probleme uygun ortogonal dizisi doğrultusunda uygun bir deney planı elde edilmektedir. Deneyleerin yapılması ve kalite karakteristiklerine ait ölçüm sonuçlarının alınmasının ardından TOPSIS yöntemi kullanılarak çok yanıtlı problem tek yanıtlı bir hale dönüştürülmektedir. Geliştirilen bilgisayar uygulamasında tek kalite karakteristikli, iki kalite karakteristikli veya üç kalite karakteristikli herhangi bir parametre tasarım problemi eniyilenebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kalite iyileştirme, Parametre Tasarımı, Çok Ölçütlü Karar Verme, Taguchi yöntemi, Çok Yanıtlı Eniyileme

Development of a Computer Application for Multi-Response Taguchi Optimization

ABSTRACT

In this study, a computer application has been developed for the parameter optimization problem having maximum three quality characteristics and three parameters having three levels for each parameter. When the quality characteristics and the level of the parameters affecting the problem are obtained, appropriate Taguchi array in accordance with an appropriate experimental design is determined by using the developed application. After the collection of the experimental results for the quality characteristics, multi-response optimization problem is converted to single response problem by using the TOPSIS method. In the developed application any parameter design problems having single, two or three quality characteristic can be optimized.

Keywords: Quality improvement, Parameter design, Multi-Criteria Decision Making, Taguchi Method, Multi-Response Optimization

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu çalışmanın amacı, herhangi bir kalite iyileştirme problemi için 3 parametre ve her parametre için düşük, orta ve yüksek olmak üzere 3 düzey belirlendiği takdirde, en fazla 3 adede kadar belirlenebilecek kalite karakteristiklerinden beklentileri sağlayacak en iyi parametre düzeylerinin tespiti için bir bilgisayar uygulamasının geliştirilmesidir. Bilgisayar uygulamasının geliştirilme amacı ise, işletmesindeki herhangi bir kalite probleminin çözümü için kolay ve hızlı bir biçimde kullanılabilir bir aracın sanayideki yöneticilere ve çalışanlara sunulabilmesidir. Bu kapsamda hedeflenen kullanıcılar daha çok KOBİ işletmeleridir. KOBİ'lerdeki kalite iyileştirme çalışmalarına yönelik bilgi birikimi tam olarak yaygınlaşmadığından, bu tür uygulamaların KOBİ'lerin ürün veya süreçlerinin iyileştirilmesinde fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Tasarım veya süreçlere ait kalite karakteristiklerinin eniyilenmesi için uygun tasarım veya süreç parametrelerinin tespiti amacıyla

bilgisayar uygulamasında en fazla 3 seviyeli ve 3 parametrelili problemler için uygun ortogonal tasarım olarak L4 ve L9 tasarımları belirlenmiştir. Geliştiren bilgisayar uygulamasına gerekli parametre ve seviye bilgileri girildikten sonra, uygulama uygun deney düzenini kullanıcıya seçtirmekte ve elde ettiği deney sonuçlarını ekrana girmesini istemektedir. Ardından kalite iyileştirme problemi eğer tek yanıtlıysa Taguchi eniyilemesini, 2 veya 3 yanıtlıysa da TOPSIS ile bütünleşik Taguchi eniyilemesini kullanarak en iyi parametre seviyelerini sunmaktadır. Geliştirilen bilgisayar uygulaması C# yazılım dili kullanılarak oluşturulmuş olup, detaylı bilgilere ilerleyen bölümlerde yer verilmiştir.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE SURVEY)

Taguchi yönteminin uygulanmasıyla ilgili literatür incelendiğinde, yöntemin kullanıldığı çeşitli çalışmalara rastlanmaktadır. Kumar ve arkadaşları [1] Taguchi yöntemini kullanarak döküm prosesinin parametrelerini eniyilemeye çalışmışlardır. Dovey ve Matthews [2]

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: ytansel@baskent.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 311-323

çalışmalarında matkap uçlarının PVD (Physical Vapor Deposition) tekniği kullanılarak TiN (Titanium Nitrit) kaplaması uygulamasında performans istatistiği olarak kayıp fonksiyonunu ele almışlardır. Yang ve Tang'ın [3] gerçekleştirdiği çalışmada, S45C çelik çubukların tornalama işleminde kesici takım faktörlerinin en iyi seviyelerinin belirlenmesi için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Kıvak [4] PVD ve CVD kaplanmış kesici uçlarla Hadfield çeliğinin frezelemesinde kesici uç yan yüzey aşınmasında (kalite karakteristiği) etkili olan kesme parametrelerinin eniyilemesini gerçekleştiren bir çalışma sunmuştur. Çalışmada kesme parametreleri olarak kesme hızı (3 seviyeli), ilerleme hızı (3 seviyeli) ve kesici takımı kaplama tipi (2 seviyeli: PVD-kaplanmış, CVD-kaplanmış) kullanılmıştır. Başka bir çalışmada Pınar ve Güllü [5] sayısal denetimli hidrolik konumlama sisteminin konumlama hatasında etkili olan her biri 2 seviyeli 4 adet parametreyi kullanarak (ilerleme oranı, hareket mesafesi, atalet yükü ve yönlenme) konumlama hatasını en küçükleyecek en iyi parametre seviyelerinin belirlenmesinde Taguchi yöntemiyle bir eniyileme çalışması gerçekleştirmiştir. Çakıroğlu ve Acır [6] ise delme işleminde matkap ucu sıcaklığına bağlı olan kesme parametrelerinin Taguchi yöntemi ile eniyilemesini gerçekleştiren bir çalışma sunmuşlardır. Çalışmada kesme işlemi sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklığı (kalite karakteristiği) en küçükleyecek parametre seviyeleri kesme hızı (3 seviyeli), ilerleme hızı (3 seviyeli) ve kesici takım ucu kaplama tipi (2 seviyeli) belirlenmeye çalışılmıştır. Literatürde birden fazla performans yanıtının eşzamanlı olarak eniyilenmesinde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri ile Taguchi yöntemi birlikte uygulanmaktadır. Burada ÇKKV yöntemi birden fazla yanıtın tek yanıtı indirilmesini sağlamak ve böylece problem klasik Taguchi yöntemiyle çözülebilecek hale gelmektedir. Kuo ve arkadaşları [7] çok ölçütlü benzetim problemlerinin eniyilemesinde Gri İlişkisel Derece (GRA) tabanlı Taguchi yöntemini uygulamışlardır. Liao [8], çok yanıtlı benzetim eniyilemesinde Taguchi tasarımı ile TOPSIS yöntemini birlikte kullanmıştır. Yang ve Chou [9] farklı ÇKKV yöntemlerini kullanarak, çok yanıtlı benzetim eniyilemesi gerçekleştirmişlerdir. Huang ve Liao [10], elektrik teli boşaltım mekanizması parametrelerinin eniyilemesinde GRA ve Taguchi yöntemini birlikte uygulamışlardır. Biswas ve arkadaşları [11] çok yanıtlı toz altı ark kaynağı eniyilemesi çalışmasında, Tong ve arkadaşları [12] ise çok yanıtlı süreç eniyilemesi amacıyla VIKOR (Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje) metodu ile Taguchi yönteminin birlikte kullanıldığı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Lan [13] bir frezeleme işlemindeki çok yanıtlı eniyileme probleminin çözümünde TOPSIS yöntemiyle Taguchi yönteminin birlikte kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmiştir. İç ve Yıldırım [14] bir çamaşır makinesinin iki yanıtı yıkama performansını geliştirmek üzere TOPSIS, GRA ve VIKOR yöntemlerini Taguchi yöntemi ile bütünleşik olarak

kullanarak yıkama performansına etkiyen en iyi faktör seviyelerinin belirlendiği bir çalışma sunmuşlardır. Gök [15] ise, Ni, Cu ve Mo alaşımlı sünek demirin tornalama işleminde yüzey pürüzlülüğünün en iyilenmesi için en iyi kesme parametresi düzeylerinin belirlenmesi amacıyla bulanık TOPSIS, gri ilişkisel analiz ve cevap yüzeyi analizi yöntemlerinin kullanıldığı bir uygulama gerçekleştirmiştir.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen bilgisayar uygulamasında ise, çok yanıtlı performans eniyilemesi için Taguchi yöntemiyle TOPSIS yöntemi bütünleştirilmiştir. VIKOR, GRA gibi diğer ÇKKV yöntemleri yerine TOPSIS yönteminin tercih edilme sebebi, yöntemin uygulama kolaylığı, işlem adımlarının kolay programlanabilir olması ve yöntemin uygulama kolaylığıyla birlikte literatürdeki diğer ÇKKV yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiğinin gösterilebilmiş olmasıdır [16].

3. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Çalışmada kullanılan ÇKKV bazlı Taguchi yöntemlerinden TOPSIS-Taguchi yönteminin uygulama adımlarına ilişkin detaylar aşağıda verilmektedir:

Taguchi tarafından önerilen ve gürbüz tasarımda gürültü faktörleri etkisini en küçükleyen üç farklı amaca uygun formülasyonlar bulunmaktadır. Bunlar; en küçük en iyi, en büyük en iyi, nominal en iyi fonksiyonlarıdır [14]:

En küçük en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

En büyük en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (2)$$

Nominal en iyi olduğu durumda:

$$S/N = -10 \log \left(\frac{\bar{y}^2}{S^2} \right) \quad (3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (4)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (5)$$

Eşitliklerde y_i ; performans yanıtının i . gözlem değeri, n ; bir denemedeki test sayısı, \bar{y} ; ortalama değeri, S^2 ; gözlem değerlerinin varyansını ifade etmektedir. Pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme en uzak seçeneği bulmayı hedefleyen TOPSIS yönteminin Taguchi yöntemi ile bütünleşik uygulanma adımları ise şu şekildedir:

1. Hesaplanan S/N oranları kullanılarak karar matrisi (A_{ij}) oluşturulur. Karar matrisinin satırlarında deney

sayıları (alternatifler), sütunlarında ise kalite karakteristikleri bulunmaktadır.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

A_{ij} karar matrisinin elemanlarından faydalanarak, aşağıdaki formül kullanılıp R_{ij} matrisi elde edilir.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad i=1, \dots, m; j=1, \dots, n \quad (7)$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2. Ağırlıklı standart karar matrisi oluşturulur. Kalite karakteristiklerine karşılık gelen ağırlıklar (w_i) belirlenir. R_{ij} matrisinin her sütunundaki elemanlarla karşılık gelen w_i değerleri çarpılır ve ağırlıklı karar matrisi V_{ij} elde edilmiş olur.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

İdeal, $A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}$ ve negatif ideal, $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$ çözümler elde edilir. İdeal çözümün bulunabilmesi için V matrisindeki sütun değerlerinin en büyükleri seçilir. Negatif ideal çözümün bulunabilmesi için ise V matrisindeki sütun değerlerinin en küçüğü seçilir.

3. Ölçütlerin ideal çözüme göre yakınlığı hesaplanır. TOPSIS yönteminde bir karar noktasının ideal çözümden sapmasını bulmak için “öklit uzaklık” yaklaşımından faydalanılmaktadır. Pozitif ideal çözüme olan uzaklık S_i^* ve negatif ideal çözüme olan uzaklık S_i^- değerleri hesaplanır. S_i^* ve S_i^- değerleri aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanır [15].

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (10)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (11)$$

4. Her karar noktasının ideal çözüme göreli yakınlığının (C_i^*) hesaplanmasında S_i^* ve S_i^- ölçütlerinden faydalanılır. C_i^* hesaplanmasında aşağıdaki eşitlikten faydalanılmaktadır [15].

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (12)$$

C_i^* değeri 0 ile 1 aralığında değer alır. $C_i^*=1$ pozitif ideal çözüme mutlak yakınlığı, $C_i^*=0$ negatif ideal çözüme mutlak yakınlığı gösterir [16].

5. Elde edilen C_i^* değerleri Taguchi metodunda yanıt değerleri olarak girilerek en iyi parametre seviyeleri elde edilir.

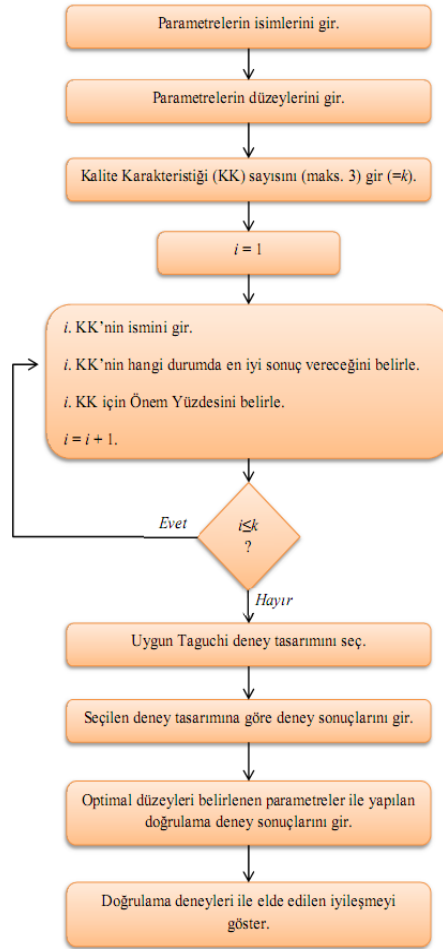
4. BİLGİSAYAR UYGULAMASININ GELİŞTİRİLMESİ (DEVELOPMENT OF COMPUTER APPLICATION)

Belirli bir proses veya tasarım için üç parametre ve üç düzey belirlenmesi koşulları altında, en fazla üç kalite karakteristiği göz önüne alındığında parametrelerin en iyi düzeylerini bulan ve kullanıcıya sunan bir bilgisayar uygulaması geliştirilmiştir. Bu bilgisayar uygulaması kullanılarak, birçok problem için parametre eniyileme çalışması yapılabilecektir.

Bilgisayar uygulaması Unity3D yazılımı kullanılarak C#(C-Sharp) dilinde yazılmıştır. Kullanıcı dostu olması nedeniyle, kullanıcı karmaşık eniyileme formülasyonlarını ve denklemlerini görmeden kolay bir şekilde eniyilemeyi gerçekleştirebilme imkânına sahiptir. Kullanıcının tek görevi programın yönlendir-

melerine uyararak ilgili alanlara gerekli bilgileri veya verileri girmesi/işaretlemeinden ibarettir. Geliştirilen programın akış şeması Şekil 1’de verilmektedir.

İlk aşamada kullanıcı probleme ilişkin eniyilenecek üç parametrenin ismini girerek uygulamayı kullanmaya başlamaktadır (Şekil 2). Programın çalışmasını



Şekil 1. Geliştirilen programın akış şeması (Flowchart of developed software)

göstermek amacıyla sanayide en yaygın kullanıma sahip talaşlı imalat işlemlerinden olan frezeleme işlemi ele alınarak geleneksel bir freze tezgahında alüminyum bir levhanın parmak frezeleme işleminin eniyilenmesi gerçekleştirilmiş ve işlem adımları geliştirilen bilgisayar uygulaması üzerinde gösterilmiştir. Örneğimizde bir frezeleme operasyonu için kesme hızı, kesici takım çapı ve kesme derinliği olarak üç temel parametre değerlendirmeye alınmıştır. Çalışmada ilgilenilen üç kesme parametresi olarak bu parametreler alınmıştır.

Şekil 2'deki gibi ekranda parametre isimleri girilip "ileri" butonuna basıldığında Şekil 3'deki gibi parametre seviyelerinin giriş ekranı belirlenmektedir. Üç tane kesme parametresinin 3'er adet parametre düzeyi belirlenmiştir. Kesme hızı parametre seviyeleri 115 devir/dk, 230 devir/dk ve 360 devir/dk olarak belirlenmiştir. Kesme derinliği parametre değerleri; 0,5 mm, 1,5mm ve 2,5 mm olarak, kesici takım çapı parametre değerleri ise 4 mm, 8 mm ve 12 mm olarak belirlenmiş ve Şekil 3'deki gibi ekranda ilgili yerlere girilmiştir. "Sonraki aşama" butonu tıklandığında kullanıcının karşısına kalite karakteristikleri ve bunların

sonra (Şekil 4'te 3 olarak belirtilmektedir) "onayla" butonunu tıklayıp kalite karakteristiklerinin isimlerini ekrana girebilmektedir. Ardından kullanıcı, kalite karakteristiklerinin hangi durumda en iyi sonucu vereceği sorusuna cevap vermelidir (Şekil 4'te her üç karakteristiğin değerinin de küçük olmasının daha iyi olması nedeniyle "en küçük" butonu işaretlenmiştir). Daha sonra ise kalite karakteristiklerinin önemlerini girmesi istenmektedir. Bu aşamada da yine kullanıcıya yardımcı olmak amacıyla önem girişleri yüzdesel olarak ifade edilerek girişlerini gerçekleştirmek için kaydırma çubukları kullanılmıştır. Bu kaydırma çubuklarından birinin değeri değiştirildiğinde diğer kaydırma çubukları kalite karakteristiklerinin toplam önem yüzdeselerini %100'e eşitleyecek şekilde kendiliğinden hareket etmektedir (Şekil 4). Şekil 4'de "deney düzenini ver butonuna basıldığında parametre sayısı ve düzey sayısına göre seçilebilecek uygun ortogonal diziler ekranda görüntülenmektedir [14]. Kullanıcı bu ekran üzerindeki uygun dizini belirledikten sonra "*" işaretini tıklayarak hangi ortogonal diziyeye göre deney planı oluşturacağını belirleyebilmektedir. Bu çalışmada,



Şekil 2. Parametre isimleri giriş ekranı (User interface to enter the name of parameters)



Şekil 3. Parametre düzeylerinin giriş ekranı (User interface to enter the level of parameters)

uygun sinyal/gürültü oranı tipinin belirlenmesi ekranı görüntülenmektedir (Şekil 4). Bu ekranda kullanıcı kaç kalite karakteristiğiyle işlem yapacağı kararını verdikten

belirlenen parametre ve seviye sayıları için L9 ortogonal dizilimi deney planı olarak seçilmiştir. Bu işlemin ardından Şekil 5'teki deney sonuçlarının giriş ekranı

görüntülenmektedir. Deneyler Taguchi'nin L9 ortogonal tasarımına uygun planla yapıldıktan sonra ekranda ilgili yerlere deney sonuçları girilmelidir.

Çalışma kapsamında frezeleme işlemine ilişkin üç adet kalite karakteristiği belirlenmiştir. Bunlar; kesme esnasında kesici takım sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), işlenen yüzeyin pürüzlülüğü (Ra) ve işlem sonrası işlenen yüzeyin sertliğidir (kgf/h).

Kesme esnasında kesici takım sıcaklığı: Talaş kaldırma sırasında sürtünmeden dolayı ortaya çıkan ısı, hem iş parçasına hem de kesici takıma çeşitli zararlar verebilir. Bu zararlar, iş parçasının fiziksel yapısının istenmeyen şekilde değişmesi, yüzey kalitesinin azalması ya da kesici takımın ömrünün kısalması olabilir [17].

İşlenen yüzeyin pürüzlülüğü: Yüzey pürüzlülüğü, kullanılan imalat metotları ile ve başka etkilere ortaya çıkan, genellikle başka düzensizliklerle sınırlanan, oldukça küçük aralıklı yüzey düzensizlikleridir. Pürüzlülük çapraz ilerleme izleri ile diğer

olması istenebileceği gibi ikincil bir imalat işlemine gidecek olan bir iş parçasının birincil işlemde yüzeyinin sertleşmesi ise istenmeyen bir durum olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde iş parçasının frezeleme işlemi sonrasında işlenen yüzeyin sertliğinin artmasının istenmediği varsayılmıştır. Çalışmada sertlik ölçümü için Rockwell yöntemi kullanılmıştır. Rockwell sertliği, koni ya da küre biçiminde bir ucun belli bir yük altında bir malzeme üzerinde oluşturduğu izin derinliğinden yararlanarak ölçülen sertlik değeridir.

Frezeleme işleminde kullanılan deney numunesi alüminyum malzemeden bir plaka olup, gerçekleştirilen deneylerin bir kısmıyla açılan kanallar Şekil 6'da verilmektedir. Deneyin rassallığını sağlamak için deneyler farklı günlerde ve deney numaraları rastgele seçilerek gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık ölçme işlemi, frezeleme işlemi esnasında yapılmıştır. İşleme başladıktan hemen sonra, işlemin ortasında ve işlem tamamlandıktan sonra olmak üzere kesici takımın sıcaklığı bir ısı çift (termo couple) kullanılarak 3 kere

Şekil 4. Kalite karakteristikleri bilgilerinin giriş ekranı (User interface to enter the information of quality characteristics)

düzensizlikleri kapsar.

Yüzey pürüzlülüğü ve hassasiyet, ürünün son amacını belirlediğinden en önemli kalite karakteristiklerinden biridir [17].

İşlenen yüzeyin sertliği: Bir malzemenin, kendisinden daha sert başka bir malzemenin batmasına, çizmesine (kalıcı şekil değiştirmesine vb.) karşı gösterdiği dirence sertlik denir.

Bazı imalat uygulamalarında aşınmaya karşı dirençli olması istenen bir makine elemanının yüzeyinin sert

ölçülmüştür.

Ardından diğer kalite karakteristiklerinin değerlerin belirlenmesi için önce işlenen yüzeyin pürüzlülüğü (Ra) ölçülmüştür (Şekil 7). Küçük bir elmas uç bulunduran yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı 2,5 cm ileri ve geri hareket ederek, ölçümünü yaptığı yüzeyin pürüzlülük değerinin cihazın ekranına yansıtılmaktadır. Her bir kanal için 3 tekrarla pürüzlülük değeri alınmıştır.

Deney no	Kesme Hızı için düzey	Kesme Derinliği için düzey	Kesici Takım Çapı için düzey	Sıcaklık			Yüzey Pürüzlülüğü			Sertlik		
				3 ölçüm			3 ölçüm			3 ölçüm		
1	115	0.5	12 *	24	26	26	1.85	1.57	1.8	66	65	65
2	115	1.5	4 *	25	25	26	1.98	2.08	1.29	66	67	66
3	115	2.5	8 *	23	25	26	4.37	3.82	3.97	70	69	69
4	230	0.5	4 *	25	25	25	1.27	1.75	1.17	66	67	67
5	230	1.5	8 *	23	35	28	3.71	3.71	3.65	68	68	68
6	230	2.5	12 *	25	36	32	1.47	2.29	2.38	72	71	72
7	360	0.5	8 *	24	27	32	2.31	3.38	2.66	67	68	68
8	360	1.5	12 *	26	32	31	2.49	2.11	1.93	73	74	73
9	360	2.5	4 *	24	25	25	2.13	2.44	1.65	65	66	66

A (around the asterisk in row 5, column 4)

B (around the 'Ekle' button)

Optimizasyonu yap

Şekil 5. Deney planı ve deney sonuçlarının giriş ekranı (Design of experiment and user interface to enter the result of experiments)



Şekil 6. İş parçası (Work-piece)



Şekil 7. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü (Surface roughness measurement)

Yüzey sertliği ölçümünde kullanılan Rockwell Yöntemi'nde metal parçayı sabitlemek için 10 kg'lık bir ön kuvvet ve parçaya bası uygulamak için de 100 kg'lık bir gerçek kuvvet uygulanmış ve yüzey pürüzlülüğü değeri cihazın ölçeğinden okunmuştur. Yüzey sertliği Rockwell Yöntemi ile $\frac{kgf}{h}$ birimiyle elde edilmiştir. Kgf (kilogram kuvvet) cisme uygulanan gerçek kuvvet değerini, h ise cisme basınç uygulandığında cismin yüzeyinde oluşan izin derinliğini ifade etmektedir. Deneylere ilişkin tüm işlemler tamamlandı elde edilen ölçüm değerleri Şekil 5'teki gibi ekrana girildikten sonra, "optimizasyonu yap" butonuna tıkladığında

uygulamanın arka planında çalışan TOPSIS tabanlı Taguchi eniyilemesiyle, hangi parametrenin hangi düzeyiyle işlem gerçekleştirilirse belirlenen kalite karakteristiklerinin en iyi değerinin elde edilebildiğini gösteren sonuç ekranı görüntülenmektedir (Şekil 8). Gerçekleştirilen uygulamada kesme hızı için 360 dev/dk (3. Seviye), kesme derinliği için 2,5 mm (3. Seviye) ve kesici takım çapı için 8 mm (2. Seviye) parametre seviyelerinde en iyi sonuç elde edilebilmektedir. Bilgisayar uygulamasında gerçekleştirilen işlemlerin açık hali adım adım ayrıca Ek-1'de verilmiştir.

Şekil 8. En iyi parametre seviyelerinin elde edilmesi ve doğrulama deneyi sonuçlarının programa girilmesi (Obtaining the ideal level of parameters and user interface to enter the results of verification experiments)

	Başlangıç Durumu			S/N	Doğrulama Deneyi			S/N
	1	2	3		1	2	3	
Sıcaklık	23	35	28	-29.2737	22.3	23.8	25.2	-27.53013
Yüzey Pürüzlülüğü	3.71	3.71	3.65	-11.34078	2.22	2.38	1.75	-6.5818
Sertlik	68	68	68	-36.65018	54	65	66	-35.83463

A **B** **C**

Şekil 9. İyileşme düzeyinin görüntülediği ekran (Resulting screen of the improvement level)

Taguchi uygulamasında son adımda elde edilen en iyi parametre değerleri kullanılarak bir doğrulama deneyi gerçekleştirilmelidir. Bu sayede elde edilen en iyi değerlerin kalite karakteristiklerinde başlangıç durumuna göre hangi düzeyde bir iyileştirme gerçekleştirebildiği belirlenmeye çalışılır. Geliştirilen programda en iyi değerlerin gösterildiği ekranda “doğrulama deneyi sonuçlarını giriniz” şeklinde bir bölüm yer almaktadır. Kullanıcı burada doğrulama deneyi sonuçlarında elde ettiği ölçümlere ilişkin 3 ölçüm sonucunu ilgili bölümlere girmelidir. İlgili bölümlere söz konusu değerler girildikten sonra “iyileşmeyi göster” butonuna basıldığında Şekil 9 ekrana gelir. Bu ekranda kalite iyileştirme çalışmasına başlamadan önce kullanılan parametre seviyelerinde elde edilen kalite karakteristikleri değerleri görüntülenmektedir. Başlangıç durumu Şekil 5’deki ekranda kullanıcı tarafından işaretlenmiş olmalıdır (Şekil 5 A). Seçilen Taguchi ortogonal dizininde (Şekil 4-L9) başlangıç durumunu ifade eden deney kombinasyonu mevcutsa ilgili deney kombinasyonuna ait kalite karakteristiği değerleri Şekil 9-A’da “başlangıç durumu” bölümüne otomatik olarak yazdırılır. Şayet seçilen ortogonal dizinde başlangıç durumuna ait deney kombinasyonu bulunmuyorsa Şekil 5 B’de görülen

“ekle” butonuna basıldığında program otomatik olarak yeni bir deney satırı ekler. Bu satıra başlangıç durumu parametrelerine göre elde edilen kalite karakteristiklerinin ölçüm sonuçlarının girilmesi gerekir. Şekil 9-A’daki başlangıç durumu için kalite karakteristikleri değerleri kullanılarak başlangıç durumu için S/N değerleri hesaplanır (Şekil 9-B). Aynı şekilde Şekil 8’de girilen doğrulama deneyi sonuçları kullanılarak da S/N oranları program tarafından hesaplanıp ekrana yazdırılır (Şekil 9-C). Böylece S/N oranı düzeyinde kalite karakteristiğinde iyileşme gerçekleşip gerçekleşmediği, gerçekleştirilen iyileşmenin düzeyi hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir. Buna göre Şekil 9 incelendiğinde her üç kalite karakteristiğinde de başlangıç durumuna göre iyileşme gözlemlendiği görülebilmektedir. Doğrulama deneyinde elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 1’de, MINITAB’da gerçekleştirilen *t testi* ile elde edilen %95 güven düzeyindeki güven aralığı değerleri ise Çizelge 2’de verilmektedir.

4.1. Programın Alternatifli Çalışma Özelliği (Flexibility level of The Software)

Geliştirilen bilgisayar uygulaması en fazla 3 adet kalite karakteristiği kullanılarak parametre eniyilemesi gerçekleştirebilmekle birlikte, esnek bir yapıda programlandığından 2 adet kalite karakteristiği için veya

Çizelge 1. Doğrulama deneyinde elde edilen sonuçlar (Results obtained from verification experiments)

Doğrulama Deneyi Sonuçları	Sıcaklık (°C)	Sertlik ($\frac{kgf}{h}$)	Yüzey pürüzlülüğü (Ra)
Ölçüm 1	22,8	54	1,75
Ölçüm 2	24	54	2,22
Ölçüm 3	22,3	66	2,38
Ölçüm 4	22,7	65	2,34
Ölçüm 5	23,2	65	1,88
Ölçüm 6	24,2	54	1,92
Ölçüm 7	25,1	65	2,15
Ölçüm 8	24,7	65	2,32
Ölçüm 9	25,2	54	1,78
Ölçüm 10	24,1	54	2,18
Ölçüm 11	23,8	65	1,98

Çizelge 2. *t*-testi ile %95 güven düzeyindeki güven aralığı değerleri (Confidence interval according to *t*-test results at 95% confidence level)

	Ortalama	Standart Sapma	%95 Güven Aralığı (Alt; Üst)
Sıcaklık	23.8273	0.9778	(23.1703; 24.4842)
Sertlik	60.0909	5.8387	(56.1684; 64.0134)
Yüzey Pürüzlülüğü	2.08182	0.22895	(1.92801; 2.23563)

Çizelge 3. L9 ortogonal deney planı (L9 orthogonal experimental design)

Deney Numarası	Kesme Hızı(devir/dk)	Kesme Derinliği(mm)	Kesici Takım Çapı(mm)
1	115	0,5	12
2	115	1,5	4
3	115	2,5	8
4	230	0,5	4
5	230	1,5	8
6	230	2,5	12
7	360	0,5	8
8	360	1,5	12
9	360	2,5	4

tek kalite karakteristiği için de parametre eniyilemesi yapacak şekilde oluşturulmuştur. Bu çalışma şekline süreçlerin iyileştirilmesiyle gerçekleştirilebilir. Bu tür iyileştirmeler ise ürün kalitesi ve dolayısıyla müşteri

Çizelge 4. Deney sonuçları (Experimental results)

Sıcaklık			Pürüzlülük			Sertlik		
1	2	3	1	2	3	1	2	3
24	26	26	1,85	1,57	1,8	66	65	65
25	25	26	1,98	2,08	1,29	66	67	66
23	25	26	4,27	3,82	3,97	70	69	69
25	25	25	1,27	1,75	1,17	66	67	67
23	35	28	3,71	3,71	3,65	68	68	68
25	36	32	1,47	2,29	3,38	72	71	72
24	27	32	2,31	3,38	2,66	67	68	68
26	32	31	2,49	2,11	1,93	73	74	73
24	25	25	2,13	2,44	1,65	65	66	66

Şekil 10. Kalite karakteristikleri bilgilerinin giriş ekranı - Senaryo 1 (User interface to enter the information of quality characteristics – Scenario 1)

ilişkin olarak iki örnek aşağıda sunulmaktadır.

Örnek 1: Gerçekleştirilen uygulamada eğer Şekil 4'te "sıcaklık" ve "yüzey pürüzlülüğü" olmak üzere iki kalite karakteristiğiyle eniyileme yapılmak istendiğinde ve sıcaklığın önem yüzdesi %70, yüzey pürüzlülüğünün önem yüzdesi %30 olarak belirlendiğinde (Şekil 10) en iyi parametre seviyeleri kesme hızı için 360 dev/dk (3. Seviye), kesme derinliği için 1,5 mm (2. Seviye) ve kesici takım çapı için 8 mm (2. Seviye) olarak elde edilebilmektedir.

Örnek 2: Diğer taraftan programda sadece "sıcaklık" kalite karakteristiğine göre eniyileme yapıldığında ise TOPSIS yöntemine ihtiyaç ortadan kalkmakta ve en iyi parametre seviyeleri tek yanıtı Taguchi eniyilemesi yöntemi prensipleriyle elde edilmektedir. Bu durumda kesme hızı için 230 dev/dk (2. Seviye), kesme derinliği için 1,5 mm (2. Seviye) ve kesici takım çapı için 12 mm (3. Seviye) en iyi parametre seviyeleri olarak tespit edilmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Üretim yapan her tesisin, üretimin doğası gereği israfları olduğu bir gerçektir. Kaliteli üretim yapmak öncelikli tasarımdan ve proses özelliklerinden kaynaklanan başarısızlıkların azaltılması amacıyla tasarım ve

memnuniyetinde olumlu etkiler yaparak işletmelerin karlılıklarını olumlu etkileyebilecektir.

Üretim ve hizmet sektöründe kaliteye verilen önemin artması ve kalite arayışında bilimsel metotlara başvurulması yukarıda belirtilen hedeflerin gerçekleştirilmesi için en önemli yoldur. Ancak kalite iyileştirmeye yönelik olarak bilimsel metotların öğrenilmesi, benimsenmesi, içselleştirilmesi ve uygulanması bilgi birikimi ve deneyimin gelişmesine doğrudan bağlıdır. Bu nedenle özellikle ülkemizdeki KOBİ'lere kalite iyileştirme çalışmalarında bilimsel metotlara dayanan araçların sunulmasının önemli katkılar sağlayabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışma kapsamında bu amaçla geliştirilen bilgisayar uygulaması; kalite iyileştirme, parametre tasarımı, deney düzeni ve eniyileme kavramlarına yabancı olan kullanıcılar için kolay ve hızlı bir kalite iyileştirme aracı olarak genel kabul görmüş bilimsel kavramlara ve metotlara dayanan kullanıcı dostu ve hızlı bir şekilde sonuç alınabilen bir yapıda ortaya konabilmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak, KOBİ işletmelerinin kalite arayışı sürecinde bu çalışmada sunulan bilgisayar uygulamasından faydalanabilecekleri ve üç seviyeli ve üç parametrelili, üç kalite karakteristiğine kadar olan

parametre tasarımı problemlerindeki çalışmalarda kolayca uygulayabilecekleri söylenebilir. İleriki dönem çalışmaları kapsamında bu çalışmada ortaya konan bilgisayar uygulamasının 3'ten fazla parametreyle, daha fazla seviyeli (örneğin 5 seviye) ve daha fazla kalite karakteristiğine sahip problemler için de uygun bir hale getirilmesi için çalışmalar gerçekleştirilebilir. Bu kapsamda ayrıca daha ileri hedef olarak; MINTAB, SPSS gibi istatistik paket programlarıyla etkileşimli olarak çalışabilen ve dolayısıyla daha esnek bir yapıda kullanıcıya çok farklı boyut ve özellikteki kalite iyileştirme çalışmalarında kullanılacak yazılımlar ve uygulamalar geliştirilebileceği düşünülmektedir.

EKLER (APPENDIXES)

Ek-1. Taguchi-TOPSIS Yönteminin Uygulanma Adımları (Appendix-1. Application Steps of Taguchi-TOPSIS Method)

İlk olarak kesme parametreleri ve seviyeleri kullanılarak Taguchi'nin L9 ortogonal deney planı oluşturulmuştur.

(Çizelge 3). Deney tasarımına uygun olarak deneyler gerçekleştirilerek kalite karakteristiklerine ait ölçüm sonuçları elde edilmiştir (Çizelge 4). En küçük en iyi formülü kullanılarak S/N oranları bulunmuştur. S/N oranları Çizelge 5'teki gibi elde edilmiştir.

/N oranlarını içeren Çizelge 5, TOPSIS yönteminin karar matrisini oluşturmaktadır. Bu karar matrisi kullanılarak normalize matris bulunmuştur (Çizelge 6).

Kalite karakteristiği ağırlıkları (kriter ağırlıkları) her bir

Çizelge 5. S/N oranlarının hesaplanması (Calculation of S/N ratios)

S/N Ratio	Sıcaklık	Pürüzlülük	Sertlik
1	-28,07985775	-4,83226	-36,3029
2	-28,07535028	-5,18992	-36,4349
3	-27,85329835	-12,1705	-36,819
4	-27,95880017	-3,04225	-36,4784
5	-29,27370363	-11,3408	-36,6502
6	-29,91964044	-6,39134	-37,1065
7	-28,90048234	-9,00114	-36,6077
8	-29,4792362	-6,8055	-37,3062
9	-27,84379518	-6,4388	-36,3471

Çizelge 6. Normalize matris (Normalized matrix)

Sıcaklık	Pürüzlülük	Sertlik
0,109097	0,0741	0,109991
0,10908	0,079585	0,110391
0,108217	0,186628	0,111555
0,108627	0,046651	0,110523
0,113735	0,173905	0,111043
0,116245	0,098008	0,112426
0,112285	0,138028	0,110915
0,114534	0,104359	0,113031
0,10818	0,098736	0,110125

Çizelge 7. Ağırlıklandırılmış normalize matris (Weighted normalized matrix)

Sıcaklık	Pürüzlülük	Sertlik
0,036002	0,024453	0,036297097
0,035996	0,026263	0,036429009
0,035712	0,061587	0,036813134
0,035847	0,015395	0,036472539
0,037533	0,057389	0,036644297
0,038361	0,032343	0,037100578
0,037054	0,045549	0,036601832
0,037796	0,034438	0,037300222
0,035699	0,032583	0,036341291

kalite karakteristiği için eşit ağırlıkta (0.333) alınarak normalize matrisin elemanlarıyla çarpılıp ağırlıklandırılmış normalize matris oluşturulmuştur (Çizelge 7). Ağırlıklandırılmış matriste, her bir sütundaki en büyük ve en küçük değerler yani A^* ve A^- değerleri bulunmuştur. A^* ve A^- değerleri pozitif ideal çözüm ve negatif ideal çözüm değerlerini belirtmektedirler (Çizelge 8).

Çizelge 8. A^* ve A^- değerlerinin belirlenmesi (Determination of A^* and A^- values)

	Sıcaklık	Pürüzlülük	Sertlik
A^*	0,0384	0,0616	0,0373
A^-	0,0357	0,0154	0,0362

Her bir ağırlıklandırılmış matris elemanının pozitif ideal ve negatif ideal çözümden uzaklıkları yani S^* ve S^- değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 9).

Çizelge 9. S^* ve S^- değerlerinin belirlenmesi (Determination of S^* and S^- values)

Deneysel Numarası	S^*	S^-
1	0,037223	0,009063
2	0,035414	0,010873
3	0,002694	0,046195
4	0,046268	0,000229
5	0,004329	0,042035
6	0,029245	0,017174
7	0,016106	0,030186
8	0,027155	0,019185
9	0,029142	0,017188

TOPSIS yönteminin son aşamasında ise C_i^* sıralama puanları hesaplanmıştır (Çizelge 10). Tek yanıtlı Taguchi eniyilemesi prensipleri doğrultusunda, TOPSIS yönteminden elde edilmiş olan C_i^* değerleri kullanılarak, kesme hızı, kesme derinliği ve kesici takım çapının 1,2 ve 3.düzeylerinin karşılık geldiği değerlerin ortalaması alınmıştır. Örneğin kesme hızının 1. düzeyi için $(0.19581+0.234902+0.944901)/3$ işlemi gerçekleştirilmiştir ve elde edilen en iyi parametre seviyeleri bulunmuştur (Çizelge 11).

Çizelge 10. C_i^* değerlerinin belirlenmesi (Determination of C_i^* values)

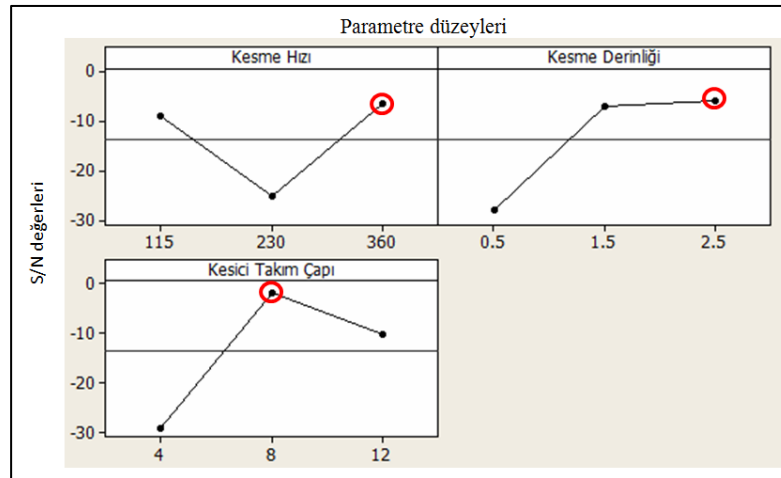
Deneysel Numarası	C_i^*
1	0,19581
2	0,234902
3	0,944901
4	0,004929
5	0,906623
6	0,369979
7	0,652076
8	0,414006
9	0,370989

Elde edilen ortalama değerlerin büyük olması istendiğinden her bir parametrenin en büyük değere karşı gelen düzeyi seçilmiştir. Sonuç olarak kesme

Çizelge 11. En iyi parametre seviyelerinin belirlenmesi (Determination of the optimum parameter levels)

Seviye	Kesme hızı	Kesme Derinliği	Kesici Takım Çapı
1	0,458537642	0,284271	0,203607
2	0,427176754	0,51851	0,834533*
3	0,479023602*	0,561956*	0,326598

*En iyi parametre seviyelerini gösterir (3,3,2)



Şekil 11. Optimal parametre düzeyleri (Optimal parameter levels)

hızının 3. Düzeyi (360 dev/dk), kesme derinliğinin

3.düzeyi (2,5 mm) ve kesici takım çapının 2.düzeyi (8 mm) en iyi parametre değerleri olarak belirlenmiştir. Taguchi - TOPSIS modelinden S/N değerlerine göre elde edilen optimal parametre seviyelerini gösteren grafik ise Şekil 11’de verilmektedir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

S/N	: sinyal/gürültü oranı
Y_i	: performans yanıtının i.gözlem değeri,
N	: bir denemedeki test sayısı,
\bar{y}	: ortalama değeri,
S^2	: gözlem değerlerinin varyansını
A	: Karar Matrisi
R	: Normalize Karar Matrisi
V	: Ağırlıklı Karar Matrisi
A^*	: İdeal Çözüm
A^-	: Negatif İdeal Çözüm
S_i^*	: İdeal noktaya uzaklık
S_i^-	: Negatif ideal noktaya uzaklık
C_i^*	: İdeal çözüme göreceli yakınlık
dev/dk	: devir/dakika
Ni	:Nikel
Cu	: Bakır
Mo	:Molibden

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kıvık T., “Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts”, *Measurement*, 50(4): 19-28, (2014)
2. Pınar A. M., Güllü A., “Sayısal denetimli hidrolik pozisyonlama sisteminin taguchi metodu ile optimizasyonu”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 25(1): 93-100, (2010)
3. Çakır R., Acır A., “Optimization of cutting parameters on drill bit temperature in drilling by Taguchi method”, *Measurement*, 46 (9): 3525-3531, (2013)
4. Kumar S., Satsang P.S., Prajapati D.R., “Optimization of green sand casting process parameters of a foundry by using Taguchi’s method”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55 (1): 23-34, (2012)
5. Dovey S.J., Matthews A., “Taguchi and TQM quality issues for surface engineered applications”, *Surface and Coatings Technology*, 110: 86-93, (1998)
6. Yang W.H., Tarn Y.S., “Design optimization of cutting parameters for turning based on Taguchi method”, *Journal of Materials Processing Technology*, 84: 122-129, (1998)
7. Kuo Y., Yang T., Huang G.W., “The use of a grey based Taguchi method for optimizing multi response simulation problems”, *Engineering Optimization*, 40 (6): 517-528, (2008)
8. Liao H.C., “Using PCR-TOPSIS to optimise Taguchi’s multi response problem”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 22: 649-655, (2003)

9. Yang T., Chou P., “Solving a multi response simulation-optimization problem with discrete variables using a multiple- attribute decision making method”, *Mathematics and Computers in Simulation*, 68: 9-21, (2005)
10. Liao J.T., Huang Y.S., “Optimization of machining parameters of wire –EDM based on grey relational and statistical analyses”, *International Journal of Production Research*, 41 (8): 1707-1720, (2003)
11. Biswas S.A., Datta S., Bhaumik S., Majumdar G., “Application of VIKOR Based Taguchi Method for Multi Response Optimization: a case study in submerged arc welding (SAW)”, *International Conference on Mechanical Engineering*, ICME 09-RT-35, 1-5, (2009)
12. Tong L.I., Chen C.C., Wang C.H., “Optimization of multi-response processes using the VIKOR method” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 31: 1049-1057, (2007)
13. Lan T-S., “Taguchi optimization of multi objective CNC machining using TOPSIS” *Information Technology Journal*, 8 (6): 917-922, (2009)
14. İç Y.T., Yıldırım S., “Çok kriterli karar verme yöntemleriyle birlikte taguchi yöntemini kullanarak bir ürünün tasarımının geliştirilmesi”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 27 (2):447-458, (2012)
15. Gök A., “A new approach to minimization of the surface roughness and cutting force via fuzzy TOPSIS, multi-objective grey design and RSA”, *Measurement*, 70: 100-109, (2015)
16. Yıldırım S., 2011. “Ürün tasarımı geliştirilmesi: Taguchi tasarımı”, *Yüksek Lisans Tezi*, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011)
17. Groover M.P., “Fundamentals of Modern Manufacturing”, *Wiley*, Third Ed., USA, (2007)

Türkçe için Wikipedia Tabanlı Varlık İsmi Tanıma Sistemi

Doğan KÜÇÜK, Nursal ARICI

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

(Geliş / Received : 18.12.2015 ; Kabul / Accepted : 26.03.2016)

ÖZ

Varlık ismi tanıma, doğal dil işleme araştırma alanında bir problemdir ve genellikle doğal dildeki metinlerden kişi, yer ve kurum isimlerinin otomatik çıkarılması olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, Türkçe için geliştirdiğimiz Wikipedia tabanlı bir varlık ismi tanıma sistemi tanıtılmıştır. Wikipedia gibi internet kullanıcıları tarafından oluşturulan kaynakların varlık ismi tanıma gibi konular için oldukça faydalı oldukları bilinmektedir. Öncelikle, Türkçe Wikipedia'dan otomatik olarak geniş bir insan ismi listesi derlenmiştir. Daha sonra, bu liste ile birlikte yine Türkçe Wikipedia'dan ve Türkçe için kural-tabanlı bir sistemden elde edilmiş kişi, yer ve kurum ismi listelerini de kullanarak Türkçe için Wikipedia-tabanlı bir varlık ismi tanıma sistemi geliştirilmiştir. Sistemimiz değişik veri kümeleri üzerinde test edilerek değerlendirilmiş ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Türkçe metinlerde bilgi çıkarımı üzerinde yapılmış kısıtlı sayıda çalışma olduğundan bizim sistemimiz bu konuda önemli bir katkı teşkil etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Varlık ismi tanıma, bilgi çıkarımı, Türkçe, otomatik metin işleme

Wikipedia-based Named Entity Recognition System for Turkish

ABSTRACT

Named entity recognition is a problem in the research area of natural language processing and is usually defined as the automatic extraction of the names of people, locations, and organizations in natural language texts. In this study, a Wikipedia-based named entity recognition system for Turkish is introduced. It is well-known that resources like Wikipedia, which are created by internet users, are considerably important for topics like named entity recognition. We have first automatically compiled a large list of person names from Turkish Wikipedia. Then, we have developed a Wikipedia-based named entity recognition system for Turkish which utilizes this large list with other lists of person, location and organization named obtained from Turkish Wikipedia and a former rule-based named entity recognizer for Turkish. We have evaluated our system on different types of datasets and obtained promising results. Our system is a significant contribution to information extraction on Turkish texts since there are limited number of related studies carried out so far.

Keywords: Named entity recognition, information extraction, Turkish, automatic text processing

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkçe'de doğal dil işleme ve özellikle bilgi çıkarımı konusunda yapılan çalışmalar; İngilizce, Almanca ve Fransızca gibi diğer dillerdeki metinler üzerinde yapılan çalışmalara göre sayısal olarak ve kapsam olarak oldukça sınırlıdır. Bununla beraber, her gün Türkçe dilinde de hatırı sayılır miktarda doküman oluşturulmaktadır ve bu dokümanlardaki bilgilerin otomatik olarak çıkarılması otomatik bilgi erişimi, soru cevaplama ve özetleme gibi sistemler için oldukça fazla önem arz etmektedir.

Varlık ismi tanıma, doğal dildeki metinlerden insan, yer ve kurum ismi gibi isimleri çıkarma ve bunları türlerine göre sınıflandırma şeklinde tanımlanmaktadır [1]. Türkçe metinler üzerinde de İngilizce gibi diller üzerinde yapılan çalışmalarla karşılaştırılınca kısıtlı olsa da yapılmış birtakım çalışmalar vardır. Türkçe üzerindeki varlık ismi tanıma çalışmalarının bilginimiz

dâhilindeki ilkinde dilden bağımsız bir sistem sunulmuş ve bu sistem Türkçe ile birlikte Hintçe, İngilizce, Rumence ve Yunanca dilleri üzerinde de denenmiştir [2]. Bu konuda yapılan ilk çalışmalardan bir diğerinde Saklı Markov Modelleri (Hidden Markov Models) kullanılmıştır [3]. Daha sonra yapılan bir çalışmada, Türkçe için kural-tabanlı bir varlık ismi tanıma sistemi tanıtılmıştır [4]. Sonrasında farklı kural-tabanlı varlık ismi tanıma sistemleri de sunulmuştur [5]. Bir diğer çalışmada, Türkçe'de varlık isimlerini tanımak için otomatik olarak kural öğrenen bir sistem tanıtılmıştır [6]. Şartlı Rasgele Alanlar (Conditional Random Fields) adlı makine öğrenmesi yönteminin diğer dillerde varlık ismi tanımadada da başarılı olduğu gösterilmiştir [7]. Bu nedenle, Türkçe metinlerde varlık ismi tanımadada da Şartlı Rastgele Alanlar yöntemini kullanan çalışmalar olmuştur [8,9,10]. Daha önce sunulmuş kural-tabanlı sistemini, basit bir öğrenme yöntemi olan ezber yöntemiyle (rote learning) birleştirerek geliştirilmiş melez (hybrid) bir varlık ismi tanıma sistemi de

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: nursal@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 325-332

mevcuttur [11]. İlgili bir diğer güncel çalışmada da Türkçe metinlerde varlık ismi tanıma için yapay sinir ağları kullanılmıştır [12].

Yukarıda bildirilen çalışmaların tümü çoğunlukla dilbilgisi ve yazım hatalarının bulunmadığı haber metinleri için geliştirilmiş ve bu türdeki metinler üzerinde değerlendirilmiştir. Yakın zamanda ise, sosyal medya metinlerinin otomatik olarak işlenmeleri gerekliliğinin ortaya çıkmasından dolayı tweet metinleri gibi çoğunlukla dilbilgisi ve yazım hatalarının bulunduğu metinler üzerinde varlık ismi tanıma çalışmalarına başlanmıştır [13]. Haber metinleri için geliştirilmiş veya bunlar üzerinde eğitilmiş sistemlerin direk olarak tweet metinlerinde oldukça kötü değerlendirme sonuçları aldıkları görülmüştür ve dolayısıyla bu yeni metin türü için kendine özgü sistemlerin geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [13]. Bu nedenle, yakın dönemde Türkçe tweet'ler üzerinde de varlık ismi tanıma değerlendirmeleri ile bu metinler üzerinde başarımlar değerlendirme sonuçlarını artırmaya yönelik çalışmalar yapılmıştır [14,15,16].

Bu çalışmada, Türkçe varlık ismi tanıma için Türkçe Wikipedia [17] kaynaklarının kullanılması sağlanmıştır. Türkçe varlık ismi tanıma Wikipedia'dan yararlanılması konusunda bilgimiz dâhilinde literatürde sadece bir çalışmaya [18] rastlanmıştır. Bu çalışmada Türkçe Wikipedia başlıklarının yirmide biri varlık isimleriyle elle işaretlenmiş, ardından bu küme eğitim kümesi olarak kullanılarak en yakın k komşu (k-nearest neighbors) algoritması kullanılarak kişi, yer ve kurum isimleri elde edilmiştir. Bizim çalışmamız bu çalışmadan hem yöntem olarak hem de elde edilen kaynakların boyutları açısından farklıdır. Ayrıca, bizim çalışmamızda bu çalışmada [18] elde edilen kaynaklar da kullanılmıştır.

Öncelikle Wikipedia'dan otomatik olarak öğrenilen büyük boyutlu bir kişi ismi listesi kullanılarak Wikipedia tabanlı bir kişi ismi tanıma sistemi geliştirilmiştir. Daha sonra ise, bu liste diğer Wikipedia'dan öğrenilmiş kişi, yer ve kurum ismi listeleri [18] ve önceden geliştirilmiş olan kural-tabanlı sistemin [4] sözlüksel kaynakları ile beraber kullanılarak Türkçe Wikipedia tabanlı varlık ismi tanıma sistemi geliştirilmiştir. Sistemlerimiz daha önceki sistemler tarafından da kullanılan çok çeşitli türlerdeki veri kümeleri üzerinde değerlendirilmiş ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir.

Çalışmamızın ilgili literatüre katkıları aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

1. Çalışmamız kapsamında tam otomatik bir yöntemle Türkçe Wikipedia'dan hatırı sayılır boyutta bir kişi ismi listesi oluşturulmuş ve bu kaynağı kullanarak yüksek doğrulukta sonuçlar veren bir Türkçe kişi ismi tanıma sistemi geliştirilmiştir. Söz konusu kişi ismi tanıma sistemi Türkçe Wikipedia'yı varlık ismi tanıma kaynağı olarak kullanan öncül çalışmalardandır.

2. Wikipedia'dan otomatik olarak farklı bir çalışma kapsamında [18] çıkarılan kişi, yer ve kurum ismi listeleriyle, önceden sunulan kural-tabanlı bir sistemin kişi, yer ve kurum ismi listeleri de bu sistemin bünyesine katılarak Türkçe için Wikipedia tabanlı tam bir varlık ismi tanıma sistemi geliştirilmiştir.
3. Her iki sistem başarımları da çeşitli boyut ve özelliklere sahip farklı veri kümeleri üzerinde değerlendirilmiş ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneme veri kümelerinin türleri ve toplam boyutları dikkate alındığında, mevcut çalışmamızın şu anda kadar Türkçe varlık ismi tanıma konusunda yapılmış en kapsamlı değerlendirmeyi içerdiği söylenebilir.

2. WIKIPEDIA TABANLI KİŞİ İSMİ TANIMA SİSTEMİ (WIKIPEDIA BASED PERSON NAME RECOGNITION SYSTEM)

Türkçe metinlerde kişi ismi tanıma probleminin, yer ve kurum ismi gibi diğer varlık isimlerinin tanınmalarına göre daha zor bir problem olduğu bilinmektedir. Var olan birçok çalışmada, kişi ismi tanıma performansının diğer türlerin tanıma performanslarından daha düşük olduğu belirtilmektedir.

Türkçe metinlerde kişi ismi tanıma yaşanan zorluğun en büyük nedeni, yaygın kişi isimlerinin Türkçe'deki nesne isimleriyle eş sesli olmasıdır. Örnek olarak; *Onur, Bilge, Ela, Yağmur, Damla, Deniz, Savaş, Barış, Kartal, Şahin* gibi isimler yaygın kişi isimlerindedir ancak aynı zamanda Türkçe'deki nesne isimleri ve sıfatlarla da eş seslidirler. Bunun dışında; *Nisan, Eylül, Ekim, Kasım* gibi yaygın kişi isimleri de Türkçe'deki ay isimleriyle eş seslidirler.

Dolayısıyla, Türkçe'deki kişi isimlerini içeren uzun bir listedeki elemanların verilen bir metinde taranarak art arda en az bir kelimedenden oluşan çakışmaların kişi ismi olarak işaretlenmesi fazladan yanlış işaretlemelere neden olmaktadır.

Wikipedia gibi internet kullanıcılarının ortak olarak düzenledikleri bilgi tabanlarında haberlerde geçen birçok ünlü kişiye ait başlıklar mevcuttur. Wikipedia'nın başlık isimleri ve makalelerinin metinleri açık olarak mevcuttur ve araştırma amaçlarıyla kullanılabilir.

Türkçe Wikipedia'ya Java programlama dili ile erişebilmek için bu dili kullanan ve erişimi sağlayan JWPL (Java Wikipedia Library) adlı kütüphane [19] kullanılmıştır.

Öncelikle, Türkçe kişi isimlerine karşılık gelen makale başlıklarının genelleme; X bir yıl olmak üzere "*X doğumlular*" ve "*X yılında ölenler*" desenlerine sahip Wikipedia kategorileri altında yer aldıkları gözlemlenmiştir. Örneğin "*1900 doğumlular*" kategorisi altında 1900 yılında doğmuş olan ünlü kişilere ait Wikipedia makaleleri yer almaktadır. Benzer şekilde "*1900 yılında ölenler*" kategorisi altında 1900 yılında

ölmüş ünlü kişilerin makaleleri yer almaktadır. Bu iki kategoriye ait örnek bir Türkçe Wikipedia kategori sayfası aşağıda verilmiştir:

https://tr.wikipedia.org/wiki/Kategori:1926_do%C4%9Fumlular

(1926 yılında doğan kişilerin sayfalarının bağlantılarının bulunduğu kategori sayfası)

https://tr.wikipedia.org/wiki/Kategori:1998_y%C4%B1l%C4%B1nda_%C3%B6lenler

(1998 yılında ölen kişilerin sayfalarının bağlantılarının bulunduğu kategori sayfası)

Bizim önerdiğimiz desen-tabanlı yaklaşım X değeri 0 ile 2014 tarihleri arasında değişecek şekilde; “X doğumlular” ve “X yılında ölenler” desenlerine uyan toplam 4.030 kategorinin altındaki makale başlıklarını otomatik olarak tespit etmiştir. Bu işlem sonucunda yaklaşık 42.500 adet Türkçe ve yabancı kişi ismi tespit edilmiştir. Bu liste içerisindeki tek kelimelik isimler diğer varlık ismi türleriyle, nesne veya sıfatlarla eş sesli olabileceğinden, listeden çıkarılmıştır.

Özellikle sosyal medya metinleri gibi metinlerde daha sık olmak üzere; Türkçe’deki ç, ğ, ı, ö, ş, ü yerine sırasıyla c, g, i, o, s, u harfleri kullanılabilir. Örneğin, “Barış Manço” yerine “Baris Manco” yazılabilir. Verilen bir Türkçe metin girdisinde, bu şekilde yazılan kişi isimlerinin de tespit edilebilmesi için; elde edilen kişi isimlerinden yukarıda belirtilen ç, ğ, ı, ö, ş, ü harflerinden en az birini içeren isimlerin her biri için bu harflerin sırasıyla karşılık gelen harflerle (c, g, i, o, s, u) değiştirildikleri halleri oluşturulmuş ve bunlar da kişi ismi listesine eklenmiştir. Bu işlemden sonra kişi ismi listesindeki isim sayısı yaklaşık 55.000 olmuştur.

Yukarıda tanıtılan kişi ismi listesi kullanılarak aşağıdaki özelliklere sahip bir Türkçe kişi ismi tanıma sistemi Java programlama diliyle geliştirilmiştir:

1. Sistem, verilen girdi metninde sırasıyla art arda gelen 7 kelimelik tüm dizileri, sonra 6, sonra 5, sonra 4, sonra 3, sonra da 2 kelimelik dizileri kişi ismi listesinde aramakta, eğer bulursa bunları Message Understanding Conference (MUC) [20] konferans serisinde varlık isimlerini işaretlemek için kullanılan ENAMEX etiketiyle işaretlemektedir. Örneğin iki kelimelik diziler kontrol edilirken “Barış Manço” dizisi bulunduğu bu dizi aşağıdaki şekilde işaretlenecektir.

<ENAMEXTYPE=“PERSON”>Barış
Manço</ENAMEX>

2. Sistem iç içe işaretlemeler yapmamakta, yukarıda belirtilen sıra takip edildiği için en fazla 7 kelimedenden oluşmak üzere en uzun diziyi işaretlemektedir. Örneğin, eğer listede hem “Ali Sami Yen”, hem de “Sami Yen” elamanları varsa ve girdi metninde “Ali Sami Yen” geçiyorsa, sistem bu kısmı aşağıdaki şekilde işaretleyerek dönmektedir.

<ENAMEX TYPE=“PERSON”>Ali Sami
Yen</ENAMEX>

Bir metinde bir varlık ismi yer aldıktan bir süre sonra yine o isme metin içinde yer verilmesi sık karşılaşılan bir durumdur. Bu şekilde metnin farklı kısımlarında gözlenen varlık isimlerinin aynı şekilde işaretlenmeleri gereklidir. Örneğin daha önce de verilen ve ODTÜ Türkçe Derlemi’nden [21] alınan aşağıdaki metinde koyu renkle gösterilen kişi: isimleri aynı gerçek kişiye karşılık gelmektedir

Osman Bölükbaşı, uzun kollarını iki tarafa açmış, ikişer üçer kişiyi kollarına almış olarak, gece boyunca bir şeyler anlattı durdu. **Bölükbaşı** anlattıkça, gruptakiler yüksek sesle kahkahalar atıyorlardı.

Yukarıdaki örnekte koyu ile yazılmış bu varlık isimleri arasındaki ilişkiye benzer ilişkilere yerel olmayan bağımlılıklar (non-local dependencies) adı verilmektedir ve varlık ismi tanıma işlemi sırasında önemli bir ipucu olarak kullanılabilirler [22]. Örneğin, bu amaçla en son metindeki 1000 kelime için yapılan sınıflandırmaların kaydedildiği ve kullanıldığı genişletilmiş tahmin tarihi (extended prediction history) adlı yöntemin başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [22].

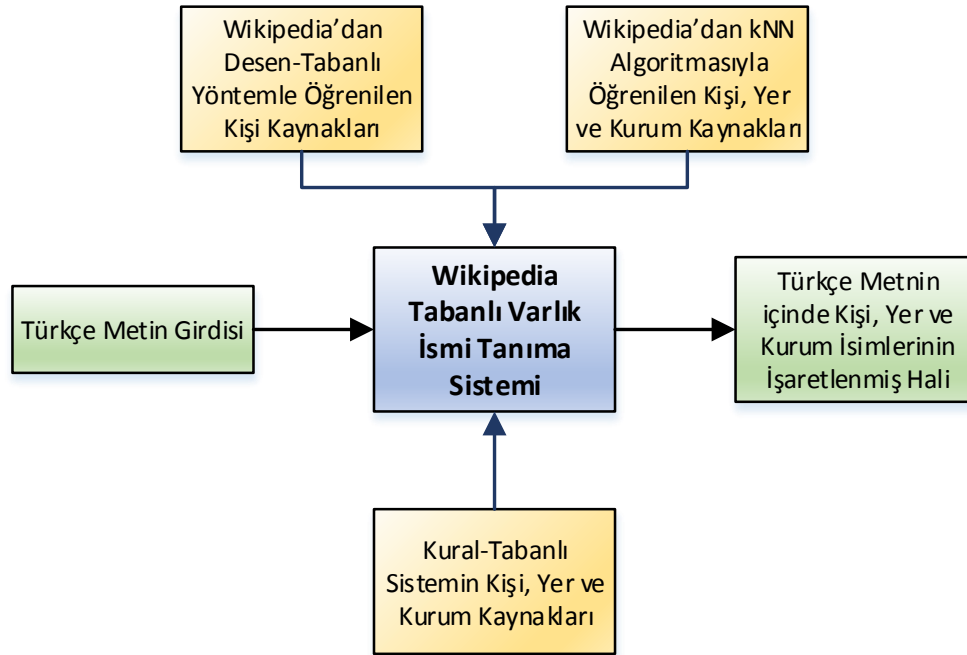
Biz de geliştirdiğimiz Türkçe kişi ismi tanıma sistemimizin kapsamını, yani tanıyabildiği kişi ismi sayısını, arttırabilmek amacıyla yerel olmayan bağımlılıkları da kullandık. Sistemimizin mevcut hali tek kelimeleri isim adayı olarak almıyordu ve dolayısıyla işaretlemiyordu. Yukarıdaki örnek metinde sadece “Osman Bölükbaşı” dizisi kişi ismi olarak sistem tarafından işaretlenmekte, ikinci cümledeki “Bölükbaşı” kelimesi sistem tarafından işaretlenmemektedir. Bu yeni sürümünde ise, sistem bir kişi ismini tanıdıktan sonra bu kişinin soyadı bir listeye ekleniyor ve bundan sonra gelen tek kelimeler de bu listede mevcutlarsa kişi ismi olarak etiketleniyorlar. Sistemin bu yeni sürümü, yukarıdaki örnek metin üzerinde çalıştırıldığında, önce “Osman Bölükbaşı” dizisini kişi ismi olarak işaretlemekte, ardından “Bölükbaşı” kelimesini soyisim listesine eklemekte, sıra ikinci cümledeki “Bölükbaşı” kelimesine geldiğinde bu kelime listede mevcut olduğundan olması gerektiği gibi kişi ismi olarak işaretlemektedir.

3. WIKIPEDIA TABANLI VARLIK İSMİ TANIMA SİSTEMİ (WIKIPEDIA BASED NAMED ENTITY RECOGNITION SYSTEM)

Bir önceki bölümde tanıttığımız kişi ismi tanıma sistemimizin Wikipedia kaynağını; daha önce tanıtılmış olan kural-tabanlı bir sistemin [4] ve önceki bir çalışmada [18] Wikipedia’dan elde edilen diğer bazı kaynaklarla kullanarak Türkçe için tam bir varlık ismi tanıma sistemini Java programlama dili ile geliştirdik.

Şekil 1’de geliştirdiğimiz sistemin genel mimarisi sunulmuştur.

da Jaccard benzerliği formülü kullanılmıştır [23]. Bu benzerlikte, benzerliği hesaplanacak ifadeler A ve B adlı iki kelime dizisi olarak alınır ve dizilerdeki kelimelerin kesişim kümesinin dizilerin birleşim kümesine oranı



Şekil 1. Wikipedia Kaynaklarını Kullanan Türkçe Varlık İsmi Tanıma Sistemi (Named Entity Recognition System for Turkish Utilizing Wikipedia Resources)

Sunulan bu yeni varlık ismi tanıma sisteminin bilgi kaynaklarının detayları aşağıda verilmiştir.

1. *Wikipedia'dan Desen Tabanlı Yöntemle Öğrenilen Kişi Kaynakları:* Bu kaynaklar bir önceki bölümde anlatılan ve desen-tabanlı bir yöntemle Wikipedia'dan otomatik olarak elde edilmiş olan yaklaşık 55,000 kişi isminden oluşan kişi ismi listesidir.

Wikipedia'dan kNN Algoritmasıyla Öğrenilen Kişi, Yer ve Kurum Kaynakları: Bu kaynaklar, ilgili çalışmada [18] açıklanan yöntemle öğrenilen kişi, yer ve kurum isimleri listeleridir. İlgili çalışmada, Türkçe Wikipedia'daki başlıkların yirmide biri elle kişi, yer veya kurum ismi olarak işaretlenmiş, daha sonra kalan başlıklar bu işaretlenmiş küme eğitim kümesi olarak kullanılarak k-nearest-neighbor (k-en yakın komşu - kNN) algoritması kullanılarak sınıflandırılmaya çalışılmıştır. Çalışmada, sınıflandırma her bir yeni aday için 0.2'den büyük benzerliğe sahip en az 5 komşu varsa, bunlardan en fazla elemana sahip sınıfa adayı atamak şeklindedir. Bu şartlar sağlanmıyorsa sınıflandırma yapılmamış böylelikle düşük güvenilirlikli kaynaklar oluşturmaktan kaçınılmıştır. Benzerlik olarak

olarak aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$|(A \cap B) / (A \cup B)|$$

Kural-tabanlı Sistemin Kişi, Yer ve Kurum Kaynakları: Söz konusu kural-tabanlı sistem [4] çalışmasında tanıtılmıştır. İnternette açık olarak mevcut kaynaklardan elle toplanmış kişi, yer ve kurum isimleri listelerini içermektedir. Kural-tabanlı sistem bu kaynaklarla birlikte bazı kurallar da kullanmakta, böylelikle bu kaynaklarda mevcut olmayan isimler de girdi olarak verilen metinden çıkarılabilmektedir.

Söz konusu kaynaklarda kesişen elemanlar bulunabileceğinden, bu yinelenen elemanların son sistemin kullanacağı kaynaklardan silinmesi için kısa bir program yazılmış ve yinelenen elemanların sayısı bire düşürülmüştür. Çizelge 1'de sistemin kaynaklarının bu silinme işlemi öncesi ve sonrası sayıları verilmektedir.

Çalışmalarımız kapsamında geliştirdiğimiz Türkçe kişi ismi tanıma ve Türkçe varlık ismi tanıma sistemlerimizi yedi farklı veri kümesi üzerinde test ettik. Söz konusu veri kümeleri ayrıca, Türkçe varlık ismi tanıma konusunda yapılmış literatürdeki çalışmalarda da deneme veri kümesi olarak kullanılmış kümelerdir. Bu

Çizelge 1. Wikipedia-tabanlı Türkçe Varlık İsmi Tanıma Sistemi'nin Kaynaklarının Dağılımı (The Distribution of the Resources of the Wikipedia Based Named Entity Recognition System for Turkish)

	<i>Wikipedia'dan Desen-tabanlı Yöntemle Elde Edilen Kişi İsmi Listesinde</i>	<i>Wikipedia'dan kNN ile Otomatik Öğrenilen Kaynaklarda</i>	<i>Türkçe için Kural-tabanlı Sistemin Kaynaklarında</i>	TOPLAM (Yinelenenlerle Birlikte)	TOPLAM (Yinelenenler Silindikten Sonra)
<i>Kişi İsmi Sayısı</i>	54872	17003	67	71942	60832
<i>Yer İsmi Sayısı</i>	0	4893	5465	10358	10185
<i>Kurum İsmi Sayısı</i>	0	2388	1043	3431	3414
TOPLAM	54872	24284	6575	85731	74431

veri kümelerinden üç tanesi genel haber metinlerinden, bir tanesi finans haberi metinlerinden iki tanesi bir sosyal medya metni türü olan tweet'lerden, bir tanesi de tarihi metinlerden oluşmaktadır. Dolayısıyla, veri kümeleri hem haber metinleri gibi hatasız metin türündeki verileri, hem de tweet'ler gibi yazım ve dilbilgisi hataları da içerebilen metin türlerinden oluşmaktadır.

Veri kümeleriyle ilgili istatistiksel bilgiler Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2'de görüldüğü üzere, veri kümelerinde yaklaşık 343.000 kelime bulunmakta ve toplam 22.941 adet de işaretlenmiş varlık ismi bulunmaktadır. Diğer kümelerden farklı olarak, Finans Haberleri Kümesi'nde yer isimleri işaretlenmemiş,

Çalışmalarımızın değerlendirilmesinde de varlık ismi tanıma sistemlerini değerlendirmede yaygın olarak kullanılan precision (P), recall (R) ve F-Measure (F) ölçütleri kullanılmıştır. Aşağıda bu ölçütlerin formülleri yüzde şeklinde verilmiştir:

$$Precision (P) = (Sistemin doğru tespitleri) * 100 / (Sistemin tüm sonuçları)$$

$$Recall (R) = (Sistemin doğru tespitleri) * 100 / (Sistemin tanınması gereken varlık isimleri)$$

$$F-Measure (F) = (2 * Precision * Recall) / (Precision + Recall)$$

Bizim çalışmamızda; bu ölçütler, bir varlık isminin ancak hem sınırları hem de türü cevap kümesindekiyle tamamen aynı ise onu doğru kabul edecek şekilde ve

Çizelge 2. Değerlendirmede Kullanılan Veri Kümeleriyle ilgili Bilgiler (Information on the Datasets Used During the Evaluation)

Veri Kümesi Adı	Kullanıldığı Çalışma	Kelime Sayısı (Yaklaşık)	Varlık İsmi Sayıları				TOPLAM
			Kişi İsmi	Birden Fazla Kelime İçeren Kişi İsmi Sayısı	Yer İsmi	Kurum İsmi	
Haber Veri Kümesi-1	Küçük ve Yazıcı (2009)	20.000	398	169	571	456	1.425
Haber Veri Kümesi-2	Tür ve ark. (2003), Şeker ve ark. (2012)	48.000	1.596	743	1.091	863	3.550
Haber Veri Kümesi-3	Küçük (2015)	100.000	3.288	1.488	2.470	3124	8.882
Finans Haberleri Kümesi	Küçük (2015)	84.000	1.115	468	0	4.521	5.636
Tarihi Metin Kümesi	Küçük ve Yazıcı (2009)	20.000	387	217	585	122	1.094
Tweet Kümesi-1	Küçük ve ark. (2014)	21.000	457	149	282	241	980
Tweet Kümesi-2	Çelikkaya ve ark. (2013)	50.000	774	190	191	409	1.374
TOPLAM		343.000	8.015	3.424	5.190	9.736	22.941

sadece kişi ve kurum isimleri işaretlenmiştir.

Türkçe metinlerde varlık ismi tanıma konusunda yapılmış çalışmaların büyük bir bölümü sadece haber metni kümeleri üzerinde denenmiştir. Bununla birlikte, az sayıda da olsa farklı metin türleri üzerinde denemeler yapılmış çalışmalar mevcuttur. Ancak, hem bu şekilde farklı türde veri kümeleri üzerinde denemelerin yapıldığı hem de söz konusu deneme veri kümelerinin bizim kullandığımız kümelerin toplam büyüklüğüne (hem kelime sayısı, hem de işaretlenmiş varlık ismi sayısı olarak) eriştiği herhangi bir çalışma bilginiz dâhilinde değildir. Bu nedenlerle, kullandığımız veri kümelerinin büyüklükleri ve çeşitliliği dikkate alınır, bu çalışmamız Türkçe'de varlık ismi tanıma konusundaki en kapsamlı değerlendirmeyi sunmaktadır.

dolayısıyla, literatürde sıklıkla kullanılan CoNLL konferans serisinde [24] verildiği şekilde hesaplanmaktadır.

Türkçe için Wikipedia'dan desen tabanlı yöntemle elde ettiğimiz listeyi kullanan ve 2. bölümde açıklanan kişi tanıma sisteminin başarımlarını değerlendirme sonuçları, yukarıda verdiğimiz ölçütler kullanılarak aşağıda Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelgede ikinci kolonda verilen precision değerleri incelenirse; bu değerlerin oldukça yüksek olduğu, yani sistemimizin precision türünde başarımlarının yüksek olduğu görülmektedir. Sistemin precision değerleri %92,11 ile %98,11 arasında değişmektedir. En yüksek precision değeri *Haber Veri Kümesi-1* üzerinde, en düşük precision değeri ise *Tarihi Metin Kümesi* üzerinde elde edilmiştir. Bu başarılı sonuçların bir nedeni Wikipedia'dan otomatik elde edilen isimlerin oldukça güvenilir olmaları, bir nedeni de hatalı işaretlemelere neden olacak tek kelimelik isimlerin listede bulunmamasıdır, yani sistemde kullanılmadan önce listeden temizlenmiş olmalarındadır.

Measure değerlerine göre oldukça yüksektir.
Özetlemek gerekirse, kişi tanıma sistemimizin tanıdığı

Çizelge 3. Wikipedia Tabanlı Kişi İsmi Tanıma Sistemi'nin Başarım Değerlendirme Sonuçları (Performance Evaluation Results of the Wikipedia Based Person Name Recognition System)

Veri Kümesi Adı	P	R	F	R (Sadece Birden Fazla Kelimelik İsimler için)	F (Sadece Birden Fazla Kelimelik İsimler için)
Haber Veri Kümesi-1	98,11	26,13	41,27	61,54	75,64
Haber Veri Kümesi-2	95,54	20,11	33,23	43,2	59,5
Haber Veri Kümesi-3	97,25	21,5	35,22	47,51	63,84
Finans Haberleri Kümesi	95,16	10,58	19,05	25,21	39,86
Tarihi Metin Kümesi	92,11	9,04	16,47	16,13	27,45
Tweet Kümesi-1	96,67	12,69	22,44	38,93	55,5
Tweet Kümesi-2	95,45	5,43	10,27	20,69	34,01

Çizelgenin üçüncü kolonundaki recall değerlerininse oldukça düşük olduğu görülmektedir. Yani sistemimizin kullandığı kişi adları listesinde bulamadığından, tanıyamadığı birçok kişi ismi kalmıştır. Bu recall değerlerinin %5,43 ile %26,13 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. En yüksek recall değeri yine *Haber Veri Kümesi-1* üzerinde, en düşük recall değeri ise *Tweet Kümesi-2*'de elde edilmiştir. Özellikle genel haber verisi kümelerinde (*Haber Veri Kümesi-1*, *Haber Veri Kümesi-2* ve *Haber Veri Kümesi-3*), recall değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Bunun önemli bir nedeni, haber metinlerinde ismi geçen kişilerin bir kısmının kendilerine ait Wikipedia sayfalarının bulunması, dolayısıyla da bizim sistemimizin otomatik olarak elde edip kullandığı isim listesinde yer almalarıdır.

Bununla birlikte, sistemimiz tek kelimelik isimleri (listesinde bu boyutta isimler bulunmadığından) hiç dikkate almadığı için recall değerlerinin Çizelge 3'ün beşinci kolonunda olduğu gibi birden fazla kelimedenden oluşan isimler üzerinden hesaplanması ve dikkate alınması daha doğru olacaktır. Çizelgedeki bu recall değerlerine baktığımızda; bu değerlerin normal recall değerlerine göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu yeni recall değerleri %16,13 ile %61,54 arasında değişmektedir ve çizelgenin son kolonundaki F-Measure değerlerinin hesaplanmasında da bu yeni recall değerleri kullanılmaktadır. Bu son kolondaki F-Measure değerleri de çizelgenin dördüncü kolonundaki F-

isimlerin çoğunun doğru şekilde tanıdığı tüm veri kümeleri üzerinde %92 ile %98 civarı precision değerleriyle kendini göstermiştir. Daha önceden geliştirilmiş olan kural-tabanlı sistemin [4] son halinin *Haber Veri Kümesi-1* üzerinde kişi ismi tanımda precision değeri %57.4 olarak bulunmuştur. Dolayısıyla sistemimizin kişi ismi tanımda recall değerleri düşük olsa da precision değerlerinin daha önceki sistemlerle karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

Çalışmamızın 2. bölümünde kişi ismi tanıma sistemimizin yerel olmayan değişkenleri de kullanarak kapsamının artırılabilceği belirtilmiş ve başlangıçtaki kişi ismi tanıma sisteminin kişi ismi listesi ile birlikte bu yerel olmayan bağımlılıkları da kullanan bir sürümü oluşturulmuştur. Bu sürümünün başarım değerlendirme sonuçları Çizelge 4'te, çizelgenin 2., 3. ve 4. sütunlarında verilmiştir.

Çizelgenin 5., 6. ve 7. sütunlarında da bu yeni elde edilen sonuçlarla, sistemin ilk sürümünün yani yerel olmayan bağımlılıkları kullanmayan ilk halinin Çizelge 5.2'de verilen sonuçları arasındaki farklar verilmiştir.

Çizelgedeki sonuçlar incelendiğinde ilk dört veri kümesi için recall değerlerinin oldukça fazla artış gösterdiği gözlenmiştir. Bu sonuçlar; yerel olmayan bağımlılıkların dikkate alınmasının kişi ismi tanıma performansını oldukça arttıracakını ortaya koymuştur. Tüm veri kümelerindeki değerlendirmelerde, sistemin precision değerlerinin çok az azaldığı görülmüştür. Bu

Çizelge 4. Wikipedia Tabanlı Kişi İsmi Tanıma Sistemi'nin Yerel Olmayan Bağımlılıkları da Kullanan Sürümünün Başarım Değerlendirme Sonuçları (Performance Evaluation)

Veri Kümesi Adı	P	R	F	ΔP	ΔR	ΔF
Haber Veri Kümesi-1	96,9	31,41	47,44	↓ 1,21	↑ 5,28	↑ 6,17
Haber Veri Kümesi-2	93,27	35,59	51,52	↓ 2,27	↑ 15,48	↑ 18,29
Haber Veri Kümesi-3	93,96	39,75	55,87	↓ 3,29	↑ 18,25	↑ 20,65
Finans Haberleri Kümesi	97,23	28,34	43,89	↓ 2,07	↑ 17,76	↑ 24,84
Tarihi Metin Kümesi	87,5	9,04	16,39	↓ 4,61	↔	↓ 0,08
Tweet Kümesi-1	93,94	13,57	23,71	↓ 2,73	↑ 0,88	↑ 1,27
Tweet Kümesi-2	93,33	5,43	10,25	↓ 2,12	↔	↓ 0,02

da beklenen bir sonuçtur, çünkü sisteme dâhil edilen tek kelimelik soyadları listesindeki elemanlardan bazıları nesne isimleri, sıfatlar ve fiiller gibi kişi ismi olmayan kelimelerle eş sesli olabilmekte, bunlar da az da olsa sistemin bu işaretlenmemesi gereken kelimeleri de kişi ismi olarak işaretlemesine neden olmaktadır.

Çalışmamızın 3. bölümünde açıkladığımız çoğunluğu Wikipedia'dan olmak üzere çok kaynaklı varlık ismi tanıma sistemimizin başarımlarını değerlendirme sonuçları da yine aynı ölçütler kullanılarak Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Wikipedia-tabanlı Türkçe Varlık İsmi Tanıma Sistemi'nin Kişi, Yer ve Kurum İsmi Tanımadaki Başarımların Değerlendirme Sonuçları (Performance Evaluation Results of the Wikipedia Based Turkish Named Entity Recognition System on the Recognition of Person, Location and Organization Names)

<i>Veri Kümesi Adı</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>F</i>
<i>Haber Veri Kümesi-1</i>	93,04	74,11	82,5
<i>Haber Veri Kümesi-2</i>	78,62	44,76	57,05
<i>Haber Veri Kümesi-3</i>	89,19	56,29	69,02
<i>Finans Haberleri Kümesi</i>	84,35	23,14	36,31
<i>Tarihi Metin Kümesi</i>	74,07	43,6	54,89
<i>Tweet Kümesi-1</i>	70,52	24,9	36,8
<i>Tweet Kümesi-2</i>	58,63	19,29	29,03

Çizelge 5'teki sonuçlar incelendiğinde özellikle haber metinlerinde, onların içinde de özellikle Haber Veri Kümesi-1 üzerinde sistemin tüm ölçütlerde başarımlarını değerlendirme sonuçlarının oldukça iyi olduğu gözlenmiştir. Sistemin herhangi bir kural listesi kullanmadan veya öğrenen sistemlerin gerektirdiği hatırı sayılır miktarda işaretli öğrenme kümesine ihtiyaç duymadan sadece çoğunluğu Wikipedia'dan otomatik yollarla elde edilmiş kaynaklarla bu değerlere ulaşılmış olması oldukça önemlidir.

Ayrıca bu sistem sadece bu şekilde Wikipedia kaynaklarından beslenen Türkçe varlık ismi tanıma için geliştirilmiş olan ilk çalışmalardan biridir. Daha önceki ilgili sadece bir çalışma mevcuttur ve o da bizim de kaynaklarını kullandığımız [18] çalışmada sunulmuştur. O çalışmada bizim çalışmamızda da kullandığımız Türkçe Wikipedia'daki başlıklardan kNN algoritması kullanılarak elde edilen kişi, yer ve kurum ismi listeleri kural-tabanlı varlık ismi tanıma sistemine ek kaynak olarak eklenmiş ve sistemin başarımlarını değerlendirme sonuçlarını iyileştirmiştir. Bizim çalışmamızda ise çoğunluğu Wikipedia'dan elde edilen tüm kişi, yer ve kurum isimleri birleştirilip fazlalıklar çıkarıldıktan sonra tam bir Türkçe varlık ismi tanıma sisteminin gerçekleştirilmesinde kullanılmışlardır. Yani, bizim sistemimiz sadece çoğunluğu Wikipedia'dan çıkarılmış sözlüksel kaynaklara dayanmaktadır.

Çalışmamızın üzerine yapılabilecek ileri çalışmalarda;

1. Türkçe yer ve kurum isimleri de bu çalışmamızda kişi isimleri için yaptıklarımıza benzer şekilde otomatik olarak elde edilebilir. Böylelikle, elde edilecek yer ve kurum isimlerini de içerecek yeni bir Türkçe varlık

ismi tanıma sistemi geliştirilebilir ve bu geliştirilecek sistemin varlık ismi tanımadaki başarımlarını daha yüksek olabilir.

2. Recall değerlerini arttırmaya yönelik çeşitli iyileştirmeler yapılabilir. İlk olarak tek kelimededen oluşan ve Wikipedia'dan otomatik çıkarılan kişi isimlerinin de sunulan sistemlere dâhil edilmesi üzerine çalışılabilir. Wikipedia gibi başka Web kaynaklarından da varlık ismi listeleri otomatik olarak çıkarılabilir ve kullanılabilir. Bunun dışında farklı

çalışmalarda özellikle recall değerlerini arttıran metotlar araştırılarak bunlar mevcut sistemlerimize entegre edilebilir.

3. Türkçe üzerine yapılmış çalışmalar dışında, değişik özelliklere sahip Arapça [25] ve Hint dilleri [26] üzerinde yapılmış çalışmalar daha detaylı olarak incelenebilir ve bu çalışmalarda kullanılan ve Türkçe'ye de uygulanabilecek başarımlarını arttırıcı metotlar mevcut sistemlerimize entegre edilebilir.
4. Son olarak, mevcut sistemlerimiz; tıp, sağlık, tarih ve sosyal bilimler gibi farklı alanlarda karşılaşılan varlık ismi türlerini de kapsayacak şekilde genişletilebilir, böylece sistemlerimiz daha geniş bir uygulama alanı kazanmış olur.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Varlık ismi tanıma, doğal dil işleme alanının konularından olan bilgi çıkarımının önemli araştırma alanlarından birisidir. Bu çalışmada, Türkçe için önce Wikipedia tabanlı bir kişi ismi tanıma sistemi, sonrasında da yine Türkçe için Wikipedia tabanlı tam bir varlık ismi tanıma sistemi sunulmuştur. Her iki sistem de Türkçe için mevcut çok farklı özelliklere sahip veri kümeleri üzerinde değerlendirilmiş ve oldukça umut verici başarımlarını değerlendirme sonuçları elde edilmiştir. Değerlendirmelerimizde kullandığımız bu veri kümelerinin büyüklükleri ve çeşitliliği dikkate alınırsa, bu çalışmamız Türkçe'de varlık ismi tanıma konusundaki en kapsamlı değerlendirmeyi sunmaktadır.

Bu çalışmamız üzerinde yapılabilecek ileri çalışmalar şunlardır: Sistemlerin recall değerlerinin de arttırılabilmesi için Web üzerinden otomatik olarak elde

edilecek başka kaynakların da sistemlere entegre edilmesi sağlanabilir. Ayrıca, sistemlerin kaynakları; tıp, sağlık, tarih, sosyal bilimler gibi diğer önemli alanlardaki varlık ismi türlerini de kapsayacak şekilde genişletilebilir ve sistemler bu alanlar için de uygulanabilir hale getirilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Nadeau, D. ve Sekine, S. "A survey of named entity recognition and classification". *Linguistica Investigationes*, 30(1): 3-26, (2007)
- Cucerzan S, Yarowsky D. "Language independent named entity recognition combining morphological and contextual evidence". *Joint SIGDAT Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Very Large Corpora*, 90-99, (1999)
- Tür, G., Hakkani-Tür, D. ve Oflazer, K. "A statistical information extraction system for Turkish". *Natural Language Engineering*, 9(2): 181-210, (2003)
- Küçük, D. ve Yazıcı, A. "Named entity recognition experiments on Turkish texts". *International Conference on Flexible Query Answering Systems*, LNCS 5822: 524-535, (2009)
- Özger, Z. B. ve Diri, B. "Türkçe dokümanlar için kural tabanlı varlık ismi tanıma". *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 6(6): 91-101, (2012)
- Tatar, S. ve Çiçekli, İ. "Automatic rule learning exploiting morphological features for named entity recognition in Turkish". *Journal of Information Science* 37(2): 137-151, (2011)
- McCallum, A. ve Li, W. "Early results for named entity recognition with conditional random fields, feature induction and web-enhanced lexicons". *Seventh Conference on Natural Language Learning at HLT-NAACL*, 188-191, (2003)
- Yeniterzi, R. "Exploiting morphology in Turkish named entity recognition system". *ACL Student Session*. 105-110, (2011)
- Özkaya, S. ve Diri, B. "Türkçe metinlerde şartlı rasgele alanlarla varlık ismi tanıma". *IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayı*, 662-665, (2011)
- Şeker, G.A. ve Eryiğit, G. "Initial explorations on using CRFs for Turkish named entity recognition". *International Conference on Computational Linguistics*. 2459-2474, (2012)
- Küçük, D. ve Yazıcı, A. "A hybrid named entity recognizer for Turkish". *Expert Systems with Applications* 39(3): 2733-2742, (2012)
- Demir H, Özgür A. "Improving named entity recognition for morphologically rich languages using word embeddings". *International Conference on Machine Learning and Applications*, 117-122, (2014)
- Ritter, A., Clark, S., ve Etzioni, O. "Named entity recognition in tweets: an experimental study". *Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 1524-1534, (2011)
- Çelikkaya, G., Torunoğlu, D., Eryiğit, G. "Named entity recognition on real data: A preliminary investigation for Turkish". *International Conference on Application of Information and Communication Technologies*, (2013)
- Küçük, D., Jacquet, G., Steinberger, R "Named entity recognition on Turkish tweets". *Language Resources and Evaluation Conference*. 450-454, (2014)
- Küçük, D., ve Steinberger, R. "Experiments to improve named entity recognition on Turkish tweets". *Workshop on Language Analysis for Social Media (LASM) of EACL*, 71-78, (2014)
- Vikpedi: Özgür Ansiklopedi, https://tr.wikipedia.org/wiki/Ana_Sayfa
- Küçük, D. "Automatic compilation of language resources for named entity recognition in Turkish by utilizing Wikipedia article titles". *Computer Standards & Interfaces*, 1-9, (2015)
- Zesch, T., Müller, C., ve Gurevych, I. "Extracting Lexical Semantic Knowledge from Wikipedia and Wiktionary". *Language Resources and Evaluation Conference*, 1646-1652, (2008)
- Grishman, R. ve Sundheim, B. "Message understanding conference-6: A brief history". *16th International Conference on Computational Linguistics*, 466-471, (1996)
- Say, B., Zeyrek, D., Oflazer, K. ve Özge, U. "Development of a corpus and a treebank for present-day written Turkish". *11th International Conference of Turkish Linguistics*, (2002)
- Ratinov, L. ve Roth, D. "Design challenges and misconceptions in named entity recognition". *Thirteenth Conference on Computational Natural Language Learning*, 147-155, (2009)
- Cohen, W., Ravikumar, P. ve Fienberg, S. "A comparison of string metrics for matching names and records". *KDD Workshop on Data Cleaning and Object Consolidation*, 73-78, (2003)
- Tjong Kim Sang EF, De Meulder F. "Introduction to the CoNLL-2003 shared task: Language-independent named entity recognition". *Seventh Conference on Natural Language Learning at HLT-NAACL*, 142-147, (2003)
- Shaalán, K. "A survey of Arabic named entity recognition and classification". *Computational Linguistics*, 40(2): 469-510, (2014)
- Sasidhar, B., Yohan, P. M., Babu, A. V., & Govardhan, A. "A survey on named entity recognition in Indian languages with particular reference to Telugu". *International Journal of Computer Science Issues*, 8: 438-443, (2011)

Eş Kanallı Açısal Presleme ve Toz Metalurjisi Yöntemiyle İşlenmiş Elementel Tozlardan Yaşlandırılabilir Al-%4Cu Alaşımların Üretimi Üzerine Bir Çalışma

Gözde VAREL¹, Ahmet GÜRAL²

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği 06500, Teknikokullar, Ankara

² Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 06500, Teknikokullar, Ankara
(Geliş / Received : 05.01.2016 ; Kabul / Accepted : 05.02.2016)

ÖZ

Günümüzde aşırı plastik deformasyon sağlayan proseslerin önemi gittikçe artmaktadır. Özellikle eş kanallı açısal presleme (EKAP) yöntemiyle metaller ve alaşımlarının mekanik özelliklerinin artırılmasının yanında kesme düzlemleriyle nano boyutlara indirgenen tane yapısının malzemelerin kimyasal özelliklerini de önemli ölçüde geliştirildiği bilinmektedir. Bu araştırma çalışmasında kütlece %4Cu olacak şekilde Al ve Cu tozları ön karıştırma ile harmanlanmıştır. Sonrasında bu karışım tozlarla iki farklı alaşım üretimi yapılmıştır. İlki EKAP kalıbında farklı sıcaklık ve pas sayıları (EKAP kalıbından tek bir geçiş) ile presleme diğer ise toz metalurjisi ile üretimdir. Üç farklı bileşen ile üretilen EKAP malzemeleri ve KTM (klasik toz metalurjisi) yöntemi ile üretilmiş malzemeler, 2 saat 600°C'de sinterlenip, 4 saat çözündürülmüş ve oda sıcaklığına su verilmiştir. Herbiri belirli zaman aralıklarında 190°C'de toplamda 20 saat yaşlandırılmıştır. Çözündürme işlemleri sonrası tüm malzemelerde %90'dan fazla yoğunlaşma oranı elde edilmiştir ve EKAPlı yoğunlaşma oranları daha yüksektir. Bu malzemelerin mikro sertliği klasik toz metalurjisi ile üretilenlerin mikro sertlikleri arasında ciddi farklar gözlenmezken, EKAP'ın aşırı plastik deformasyon ile dislokasyon yoğunluğunu artırması, toz alaşımlandırma ile üretilen bu malzemelerin mikro sertliğine olumlu etki yapmıştır. Mikroyapı analizlerinde EKAP ile üretilen malzemelerde intermetalik Al/Cu bileşeni gözlenmiştir. Yaşlandırma işlemi sonunda tüm malzemelerin yaşlanma eğrisi elde edilmiş, pik sertlikleri ölçülmüştür. Malzemeler 10 ve 15 saatler arasında yaşlanmışlardır ve en yüksek sertlik 101,3 Hv ile EKAP ile üretime aittir.

Anahtar Kelimeler: Al alaşımı, yaşlandırma, aşırı plastik deformasyon, EKAP

A Study on Production of Age-Hardenable Al-%4Cu Alloys from Elemental Powders Processed by Equal Channel Angular Pressing and Powder Metallurgy Route

ABSTRACT

Recently, severe plastic deformation (SPD) applications are getting more and more important. Especially by equal channel angular pressing (ECAP), the mechanical properties of alloys are increased. In addition that by shear planes which are activated with ECAP, the grain refinement in nano scales is obtained and it also affects and enhances even chemical properties of the materials. In this research study Al-4%(wt.)Cu powders were prepared by pre-mixing. These pre-mixed powders were used to produce ingot materials by two different methods: ECAP and classical powder metallurgy method. Materials were sintered at 600°C for 2 hours and solution treated for 4 hours at 550°C then quenched to room temperature. Then materials were aged between particular time periods for 20 hours at 190°C. After solution treatment ECAPed samples had higher densification rate than the others. The micro-hardness measurements of all samples did not contain any difference until ageing treatment. The dislocation density produced by SPD of the ECAPed samples, affected positively to micro-hardness. In micro-structure analysis Al/Cu intermetallic components are seen at ECAPed samples. Ageing plot was obtained for all samples and they were aged between 10-15 hours. The highest micro-hardness according to ageing times were 101,3 Hv which belongs to ECAPed sample.

Keywords: Al alloy, ageing, severe plastic deformation, ECAP

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: gozdevarel@yahoo.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 333-341

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Saf alüminyum ve alaşımları modern mühendislikte en çok kullanılan demir dışı malzeme olarak önemli bir rol oynar. Bu metal ve alaşımlarını yığın halde (bulk) ve

tane büyüklüğü mikron altı (100-1000 nm) veya nanometre (100 nm'den daha az) düzeylerinde üretmek amacıyla pek çok teknik ortaya çıkmıştır [1]. Toz metalürjisi (T/M) veya klasik toz metalürjisi (KTM) de üniform ve ince mikroyapılı metal parçaları üretmek için kullanılan yöntemlerden biridir [2]. Son zamanlarda Al alaşımlarında böyle bir ince mikroyapı oluşumu, sadece mekanik dayanımı değil aynı zamanda alaşımın kimyasal ve fiziksel özelliklerini de artırarak Al ve alaşımlarını yapısal ve fonksiyonel uygulamalar için daha çekici bir hale getirmiştir [1].

Tane inceltmesinde en iyi bilinen örnek aşırı plastik deformasyon (APD) teknikleridir [1]. Eş kanallı açılmalı presleme (EKAP), APD proses teknikleri arasında en çok gelişenlerdendir ve ince taneler üretiminde etkili bir araçtır [3]. Pek çok yaşlandırılabilir alüminyum alaşımının mekanik özellikleri bu metotla geliştirilebilir. EKAP sırasındaki dislokasyon yoğunluğundaki artış, sadece malzemenin dayanımının artışıyla değil, aynı zamanda yaşlanma esnasındaki çökelme oranında da artışa neden olur [4].

Şekil 1'de gösterildiği gibi bir EKAP kalıbı; kesit alanları eşit, kalıp merkezinde belirli bir açıyla kesişen iki kanal içerir. Test örneği bu kanal boyutlarına uyacak hale getirilir ve bir piston tarafından kalıba doğru bastırılır. Yük, Şekil 1 (a)'da gösterildiği üzere, örnek kalıptan geçerken üzerine verilir. Bu nedenle yalnız (basit) kesme, Şekil 1 (b)'de gösterilen 1 ve 2 olarak adlandırılmış iki komşu segment arasındaki kesme düzlemine uygulanır. Şekil 1 (a)'da gösterildiği üzere,

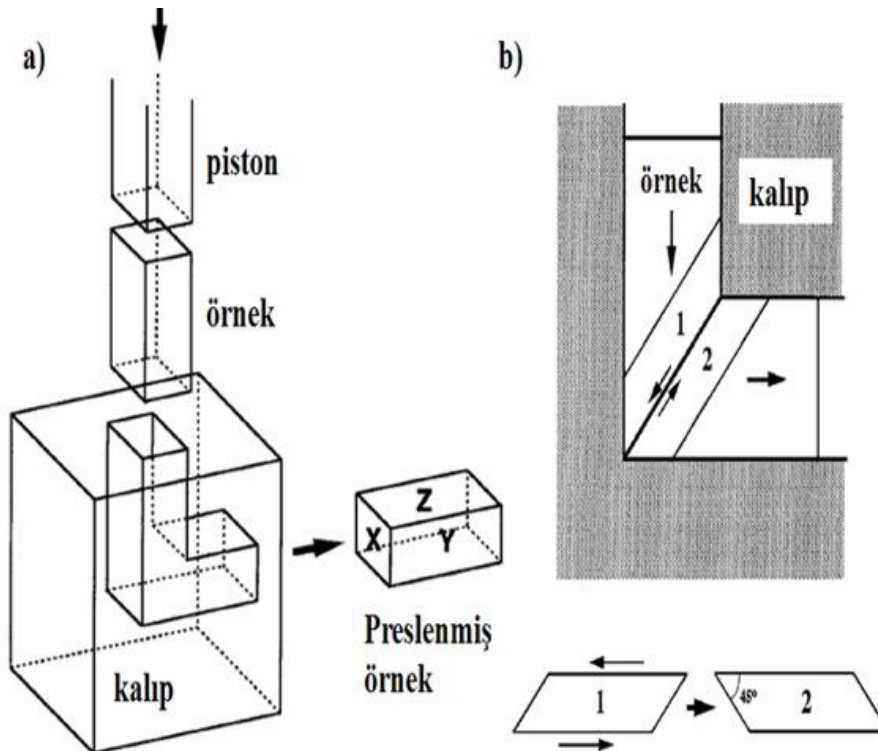
kalıptan çıkış noktasındaki örnekte üç düzlem tanımlanabilir. x düzlemi örneğin uzunlamasına eksenine diktir ve y ve z düzlemleri yan ve üst yüzeylerden paraleldir [5]. Malzemenin EKAP kalıbındaki eş kanallardan birinden preslenerek basılmasına ve diğer kanaldan çıkması işlemine "pas" adı verilmektedir.

EKAP sonrası malzemenin mekanik özellikleri incelendiğinde detaylı deneyler göstermiştir ki; EKAP, malzemelerde düzenli gerilim hızı sağlayan taneler ürettiğinde, yüksek süperplastik özellikler sağlamak için kullanılabilir. Pek çok çalışma EKAP'la malzemede yüksek gerilim oranlarında süperplastik elde edilen sonuçlar bildirmiştir [4, 5, 9-11, 13, 14].

Bu çalışmada; farklı EKAP parametreleri ile toz malzemelerden üretilmiş Al-%4Cu (kütlesel) karışımı ile klasik toz metalürjisi ile üretilmiş Al-%4Cu karışımının mikro yapısal karşılaştırılması yapılmış ve APD'nin Al-Cu alaşımının yaşlanma zamanına etkisi araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu çalışmada her biri sabit kütleli bileşimde Al-%4Cu olacak şekilde iki farklı metotla malzeme üretilmiştir. Bu metotlardan biri EKAP düzeneği diğeri ise klasik toz metalürjisi (KTM) ile üretimdir. Malzemelerde gaz atomizasyonu yöntemiyle elde edilmiş alüminyum (>%99,9 saflıkta) ve elektroliz ile üretilmiş Cu tozu

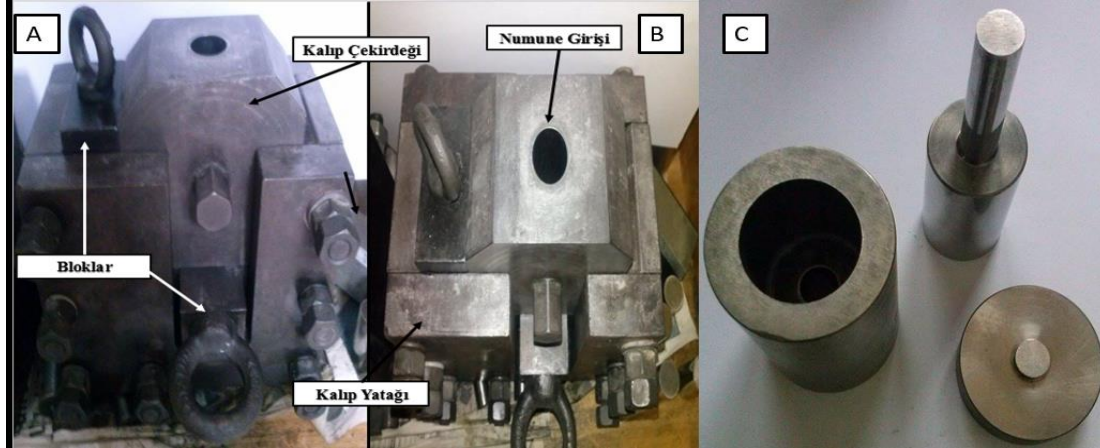


Şekil 1. EKAP numunesindeki düzlemler: (a) Üç ortogonal düzlem olan x, y ve z düzlemlerinin şematik gösterimi. (b) EKAP içerisinde birim 1 ve 2 arasındaki kesme prensibi [5] (of an ECAP Sample: (a) Illustration of three orthogonal planes x, y and z. (b) Shear principle of unit 1 and 2 in ECAP die

kullanılmıştır. Al tozlarının parçacık boyutu dağılımı ortalama 14 μ m ile 30 μ m arasında değişirken; Cu tozlarının parçacık boyutu dağılımı yaklaşık 24 μ m ile 60 μ m arasındadır. Tozlar; kütleye hassas elektronik tartıda kütleye %4'ü Cu olacak şekilde tartıldıktan sonra olabildiğince eşit dağılımları için cam bir kapta 10 dk boyunca çalkalanmıştır. Ardından vurgulu yoğunluk (tap-tensile) yöntemiyle önceden MoS₂ yağıyla

yağlanmış EKAP ve KTM (Şekil 2) kalıplarına konulmuştur. Ardından G.Ü. Teknoloji Fak. Metalurji ve Malzeme Müh. Lisansüstü Laboratuvarında bulunan özel tasarım EKAP ünitesi (Şekil 3) fırınında belirli sıcaklıklarda üretim gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde KTM malzemeleri üretilirken de EKAP ünitesinin fırından faydalanılmıştır.

Farklı sıcaklık ve pas sayılarına bağlı olarak EKAP ile



Şekil 2. Özel tasarım EKAP kalıbı (A-B) ve KTM kalıbı (C): Çap: 12 mm (A special design of an ECAP die (A-B) and P/M die (C): Diameter: 12 mm)



Şekil 3. EKAP deney düzeneği (ECAP Experimental Set-up)

Çizelge 1. EKAP yöntemi ile üretilmiş malzemelerin parametreleri (Parameters of the materials produced by ECAP method)

Numune Kodu	Bileşim (%kütleye)	Sıcaklık (°C)	Pas Sayısı	Rota
EKAP1	Al-4Cu	200	4	C
EKAP2*	Al-4Cu	200+500	4+4	C
EKAP3	Al-4Cu	200	8	C

* EKAP 2 numunesi üretilirken ilk olarak 200°C de 1 saat beklendikten sonra 4 pas, daha sonra 500°C'de bir saat beklenip ve ardından kalıbın sıcaklığı 200°C'ye düştükten sonra 4 pas daha gerçekleştirilmiştir.

üretilen numunelerin işlem şartları, numune kodları ile beraber Tablo 1’de verilmiştir.

EKAP numuneleri üretilirken kalıp sıcaklığının 200°C olması için fırının sıcaklığı 335°C’ye set edilmiştir. Ardından kalıbın istenilen sıcaklığa ulaşması için 1 saat beklenmiştir. Kalıbın sıcaklığı ısı çift vasıtasıyla devamlı olarak kontrol edilmiş ve istenilen rota ve sayıda paslar gerçekleştirilmiştir. EKAP2 numunesi preslenmeden önce, kalıp içinde 200°C’de 1 saat bekletilip 4 pas gerçekleştirildikten sonra kalıbın sıcaklığı 500°C’ye çıkarılmış ve 1 saat bekletilmiştir. 1 saat sonunda kalıbın tekrar 200°C’ye soğuması beklenmiş ve aynı rotada 4 pas daha gerçekleştirilmiştir. Klasik toz metalurjisi (KTM) yöntemi ile üretilen numunenin bileşimi aynı EKAP malzemeleri gibi kütlece %4 Cu içermektedir. Bu malzeme üretilirken EKAP ünitesi fırından faydalanılmış ve 200°C’de 1 saat bekletildikten sonra 6 ton pres yükü ile basılmıştır.

Isıl işlemlerdeki farklılıkları gözlemlemek adına malzemeler, EKAP ile üretilenlerden 2’şer numune olacak şekilde plakalar halinde dilimlenmiştir ve EKAP ve KTM numunesi toplamda 7’şer numune olacak şekilde sırayla 600°C’de sinterlenmiş, 550°C’de 4 saat çözündürülmüş ve çözündürülen malzemeler 190°C’de 5+5+5+3+2 saatlik ara basamaklarla toplamda 20 saat yaşlandırılmıştır.

Üretilen herbir malzemenin yoğunluğu ham, sinter sonrası, çözündürme sonrası olmak üzere Arşimed prensibine göre ölçülmüş ve olası değişiklikler gözlenmeye çalışılmıştır. Aynı şekilde mikro sertlik ölçümleri ham halleri, sinter sonrası, çözündürme sonrası ve yaşlandırma basamakları öncesi son kontrol ve yaşlandırma basamakları sonrası olarak Vickers cinsinden (Hv), 0,5 kg yük ve 10 s test parametreleriyle yapılmıştır.

Isıl işlemler sonlandırıldıktan sonra, EKAP pas sayısı ve sıcaklığının, Cu’nun Al matris içerisinde çözünürlüğüne etkisi, difüzyonuna katkısı ve bileşenlerin kantitatif analizi ham numunelerle birlikte ısı işlem gören numunelere yapılmıştır. Mikroyapı analizleri için EDS ünitesi Jeol 6060 LV Taramalı Elektron Mikroskobu kullanılmıştır.

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Yoğunluk Ölçümleri (Density Measurements)

Yoğunluk ölçümleri Arşimed prensibi ile sinterleme öncesi (ham), sinterleme sonrası ve çözündürme sonrası

olarak yapılmıştır. Tablo 2’de gerçek yoğunluk ve yoğunlaşma oranları sonuçları listelenmiştir.

Sinterleme öncesi, sonrası ve çözündürme işlemi sonrasında malzemelerin yoğunluklarında ciddi bir değişim gerçekleşmemiştir ancak genel olarak sonuçlar sinterleme işleminin amacına ulaştığını göstermektedir. Sinterleme sonrasında yoğunluklarında az da olsa artış gözükken numunelerin gözenek ve boşluk miktarının azaldığı söylenebilir ve malzemelerde herhangi bir distorsiyon meydana gelmemiştir. Bunun sonucu olarak malzeme daha homojen bir yapıya sahip olmuştur. Malzemelerin bu davranışları literatür sonuçları ile uyumaktadır [2, 6].

Çözündürme işleminde EKAP ile üretilen malzemelerin kendi içerisinde kıyaslaması yapıldığında ise yüksek sıcaklıkta yapılan EKAP2 malzemesinin yoğunluk değerlerinin çok daha kararlı olduğu görülürken; EKAP1 ve EKAP3 malzemelerinin yoğunluklarında daha fazla dalgalanma görülmektedir. Örneğin ham hallerinin yoğunluk oranları sırasıyla %91 ve %92, sinterleme sonrası %94 ve %92 son olarak dört saat çözündürme sonrası her ikisinin de %96’dır. Buradan yüksek sıcaklıklarda yapılan EKAP işleminin, yoğunluk kararlılığı açısından, oldukça başarılı olduğu söylenebilir. KTM yöntemi ile üretilmiş malzemenin yoğunluğunun göreceli olarak EKAP ile üretilen malzemelerinkine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Tablo 2’de verilen yoğunlaşma oranları incelendiğinde, KTM ile üretilen malzemenin yoğunlaşma oranı %91 civarındadır. Bu beklenen durum, klasik toz metalurjisi yöntemlerinde toz parçacıkları arasında kalan gözeneklerin, sinterleme aşamasında difüzyonla bağ yapmasından kaynaklanır ve izole olan gözeneklerin, iç basıncın artması nedeniyle tamamen kapanması söz konusu olamamaktadır. Öte yandan EKAP ile üretimde bu yoğunlaşma oranının biraz daha üzerine çıkılabilmektedir. Özellikle pas sayısı daha yüksek olan EKAP2 malzemesinin hiçbir ısı işlem görmemiş hali göreceli olarak daha yüksek (%93) yoğunlaşma oranına sahiptir. Çözündürme işlemine geçildiğinde bakır atomlarının alüminyum matriste dağılması ve de sıcaklıkla beraber genleşmesi yoğunlaşma oranını düşürmüştür ya da Al ve Cu atomlarının farklı difüzyon hızlarından dolayı da çözünen kütleli elementin yerinde boşluk kalmış olabilir.

3.2. SEM-EDS Mikroyapı Analizleri (SEM-EDS)

Çizelge 2. Isıl işlemler öncesi ve sonrası gerçek yoğunluk (GY, g/cm³) ve yoğunlaşma oranları (YO, %) (Measured density before and after heat treatments and densification rates)

Malzeme	Ham		Sinter Sonrası		4 saat Çöz. sonrası	
	GY	YO	GY	YO	GY	YO
EKAP1	2,68	%91	2,78	%94	2,82	%96
EKAP2	2,74	%93	2,74	%93	2,70	%92
EKAP3	2,73	%92	2,70	%92	2,82	%96
KTM	2,73	%92	2,64	%89	2,74	%92

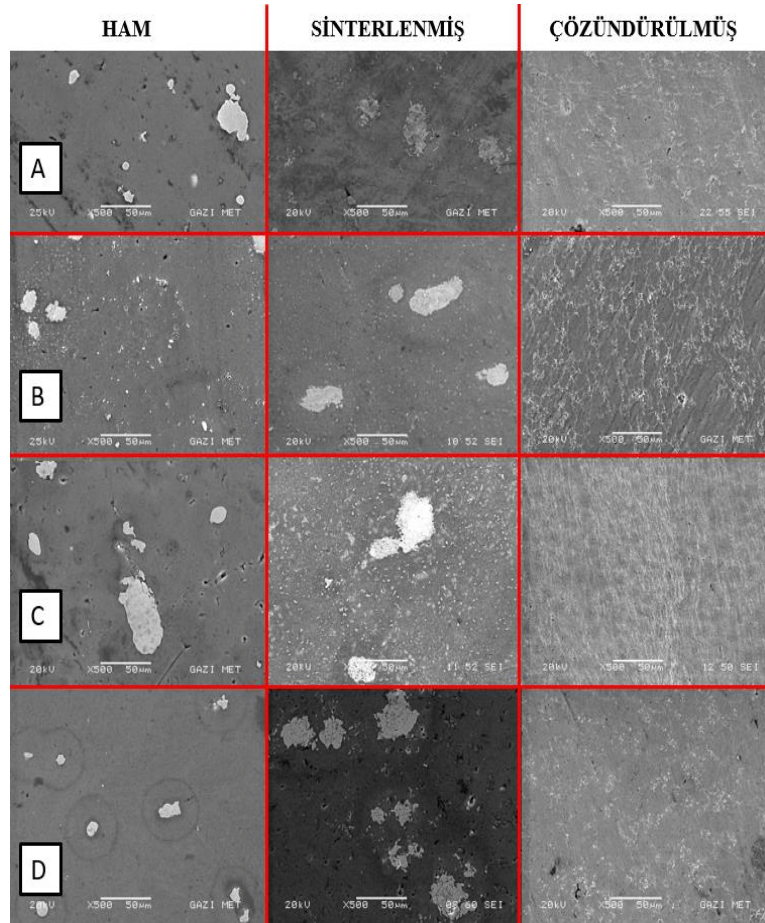
Microstructure Analysis)

SEM-EDS analizleri, sinter öncesi ısı işlem görmemiş (ham), sinterleme sonrası ve 4 saat çözündürme olarak yapılmıştır. Şekil 4’te malzemelerin ısı işlemlere göre mikro yapılarının SEM görüntüleri verilmiştir. Al matris (koyu gri) içerisinde Cu çökeltileri (açık gri) görülmektedir.

Şekil 4’de görüldüğü üzere ham EKAP2 malzemesinde Cu atomlarının diğer malzemelere göre çok daha geniş bir bölgeye yayılmıştır. EKAP2’nin daha yüksek sıcaklıklarda üretilmiş olması nedeniyle Cu atomlarının difüzyonu daha uzak mesafelerde gerçekleşebilmiştir. Çünkü bilindiği üzere katı faz difüzyonu sıcaklıkla

mikroyapılarına bakıldığında nispeten daha homojen yapı EKAP3’te görülmüştür. EKAP işlemi sırasında gerçekleştirilen tekrarlı geçişler ile hem tane inceltmesi sağlanmış hem de kayma düzlemlerinin harekete geçmesi ve yeni düzlemler oluşurmasıyla Cu atomlarının matrise biraz daha yayılması sağlanmıştır. Bu açıdan düşünüldüğünde EKAP’ın çözündürme ısı işlemine yardımcı bir görev üstlendiği sonucuna varılabilir. Tüm malzemeler ve ısı işlemler içerisinde en heterojen dağılım ise KTM malzemesine aittir

Ham malzemelerde EKAP’ın Cu difüzyonuna katkısının araştırılması açısından Şekil 5’te verilen EDS analizi incelendiğinde aynı sıcaklıkta üretilen EKAP3 ve KTM

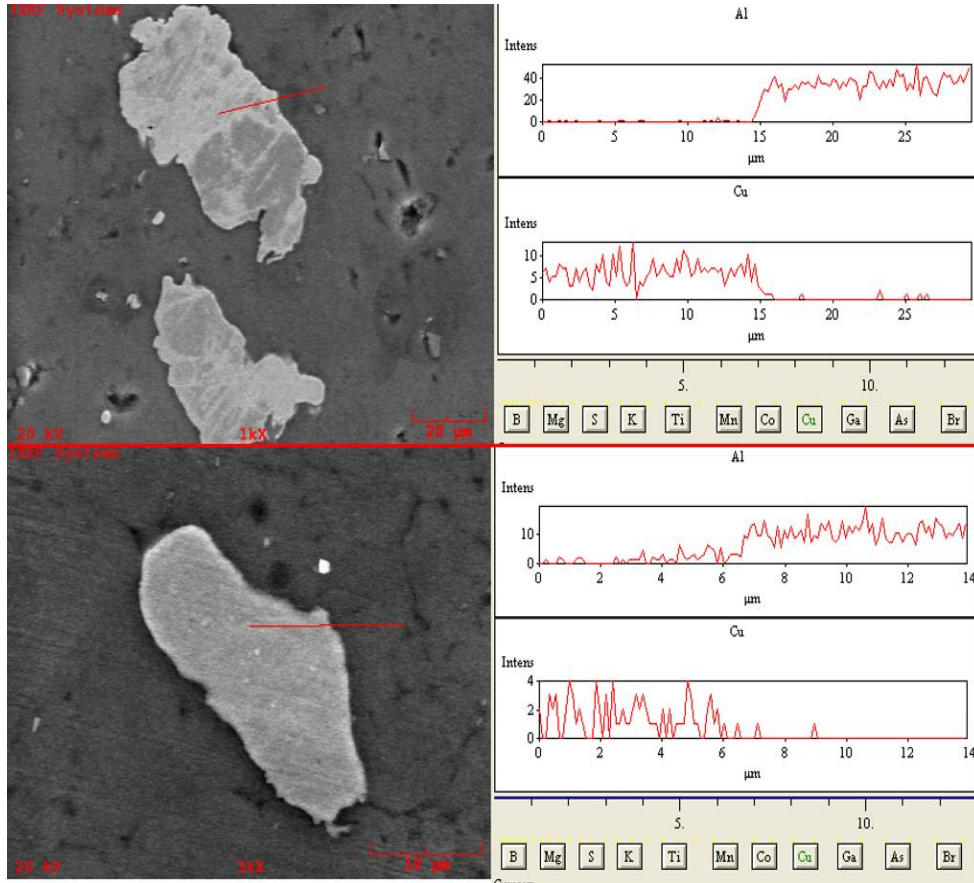


Şekil 4. Malzemelerin ısı işlemler öncesi ve sonrası mikroyapı görüntüleri; (A) EKAP1, (B) EKAP2, (C) EKAP3 ve (D) KTM numunesi (Microstructure of the materials before and after heat treatments)

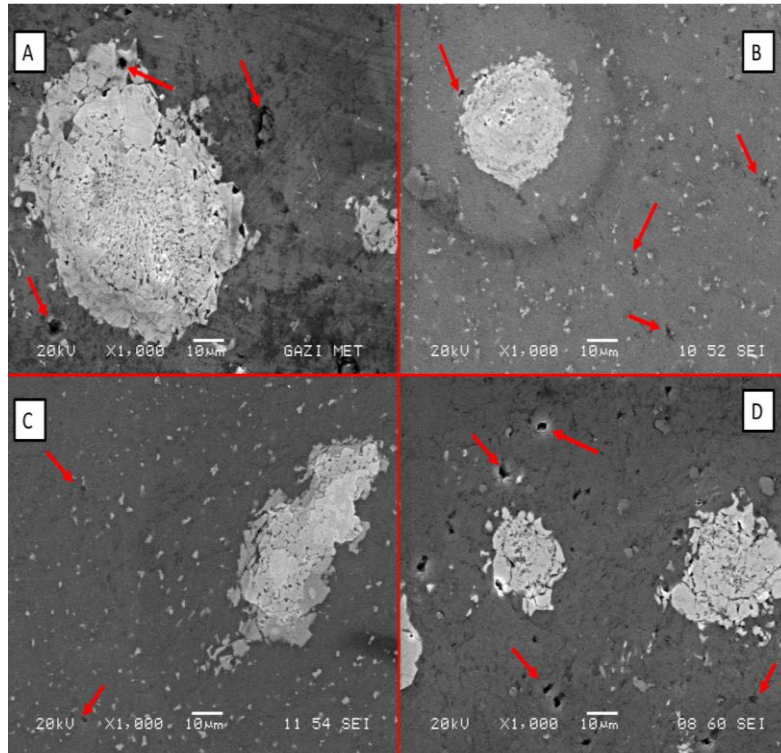
doğru orantılı olup 200°C’deki Cu atomlarının Al matris içerisindeki difüzyon hızı $8,09 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{s}$ iken 500°C’deki $4,22 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ ’dir [7]. Bunun yanında sıcaklıkları aynı (200°C) ancak pas sayıları farklı olan EKAP1 (4 pas) ve EKAP3 (8 Pas) malzemelerinin

malzemelerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Görüldüğü üzere EKAP3 malzemesine Cu kümelerinden 15µm uzakta Cu atomlarına rastlanırken, KTM malzemesinde bu mesafe 2µm’dir.

600°C’de 2 saat yapılan sinterleme işlemi sonrasında malzemelerde herhangi bir termal çarpılma gözlenmemiştir. Buradan toz harmanlama safhasının başarılı olduğu söylenebilir [8]. Malzemelerin SEM



Şekil 5.Ham EKAP3 ve KTM malzemelerindeki Cu'nun yayılma mesafesi (Diffusion distance of Cu in green EKAP3 and



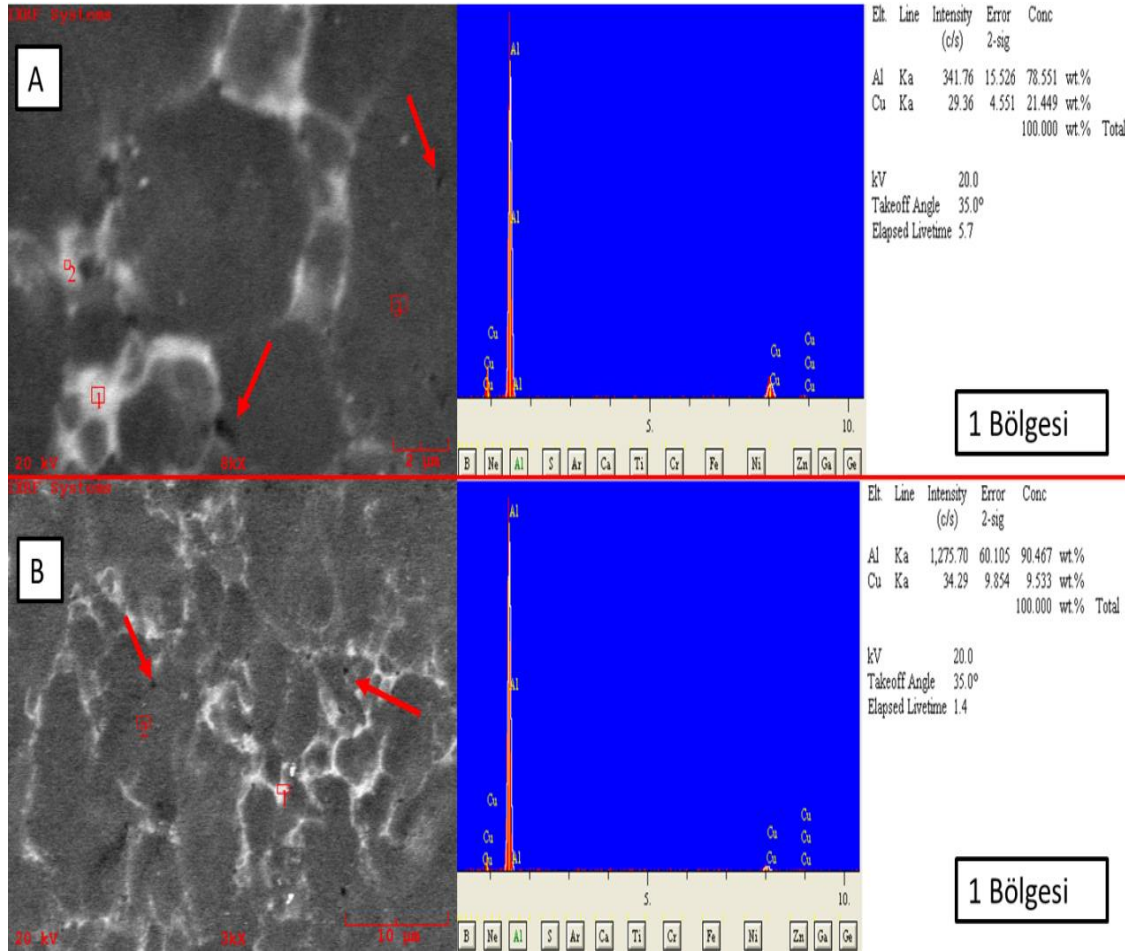
Şekil 6. Sinterleme sonrası malzemelerin mikroyapıları; (A) EKAP1, (B) EKAP2, (C) EKAP3, (D) KTM (Microstructures görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir. Belirginleşen tane sınırları ile bakır kümelerinin dağılmaya başladığı açık bir şekilde görülmektedir. Bunun yanında özellikle KTM (Şekil 6D) malzemesinin mikroyapısındaki

boşluklar (kırmızı oklarla belirtilmiş) diğerlerine göre daha çok dikkat çekmektedir. En az gözenek oluşumu ve en homojen matris dağılımı görüntüsü ise EKAP2 (B) ve EKAP3 (C) malzemelerine aittir.

Sinterlenen malzemelerden alınan numuneler dört saat 550°C'de çözündürme işlemine tutulup ardından oda sıcaklığına su verilmiştir. Ardından yapılan SEM-EDS analizlerinde EKAP1 ve EKAP2 malzemelerindeki 1 numara ile gösterilen bölgelerde Al/Cu intermetalğine rastlanmıştır (Şekil 7). Ayrıca halen matristeki bazı göze-nekler (kırmızı oklarla belirtilmiş) dikkat çekmektedir. Ancak bunların boyutları ve miktarlarının çözündürme işleminden sonra oldukça azaldığını

EKAP1 malzemesi iken sinterleme sonrası en yüksek sertlik EKAP2 ve son olarak da 4 saatlik çözündürme sonrası en yüksek mikro sertliğe ulaşan malzeme EKAP3'tür. KTM malzemesinde çözündürme işlemi sonrası ham haline göre %19 oranında bir artış elde edilirken EKAP1, EKAP2 ve EKAP3 için bu oranlar sırasıyla; %17, %13 ve %40'tır.

Sinterleme sonrası malzemelerin mikro sertliğinde düşüş gözlenmiştir ve bu düşüş en az EKAP2'de meydana gelirken en çok EKAP1 ve KTM malzemelerinde görülmüştür. EKAP2 malzemesinin mikro sertliği çok daha kararlı bir durum sergilemiştir çünkü üretimi yapılırken sinterleme sıcaklığına yakın



Şekil 7. Dört saat çözündürme sonrası mikroyapı görüntüleri ve EDS analizi sonuçları; (A) EKAP1, (B) EKAP 2 (Microstructure images after 4-hour solution treatment and results of EDS analysis)

görülmüştür.

Genel olarak bakıldığında sinterleme ve çözündürme işlemlerinin kısmen amacına ulaştığı SEM-EDS analizlerinden görülmektedir.

3.3. Mikro Sertlik Analizleri (Micro-Hardness Analysis)

Mikro sertlik analizler hiçbir ısıl işlem görmemiş, sinterleme sonrası ve dört saat çözündürme sonrası malzemelere uygulanmıştır. Tablo 3'te bu ölçümlerin sonuçları standart sapmaları ile birlikte verilmiştir. Ham malzemelerde en yüksek mikrosertliğe sahip olan

bir sıcaklık kullanılmıştır.

EKAP işleminin tekrarlı paslarla dislokasyon yoğunluğunu artırıp malzemelerin sertliklerinin yanında diğer mekanik özelliklerinin de önemli ölçüde artırdığı bilinen bir gerçektir [9-11]. Ancak genel olarak yapılan çalışmalar ingot şeklinde dökülmüş ticari Al ve alaşımlarının EKAP işlemine sokulması olarak gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmayı diğerlerinden ayıran en önemli özellik ise metal tozu karışımlarının direkt olarak EKAP işlemine sokulup üretilmesi olduğundan aynı sıcaklıklarda üretilen KTM malzemesine kıyasla EKAP1 ve EKAP3 malzemelerinin çok daha yüksek

dayanımlara ulaşması EKAP işleminin toz alaşımlandırma prosesine olumlu etkisinin bir göstergesidir.

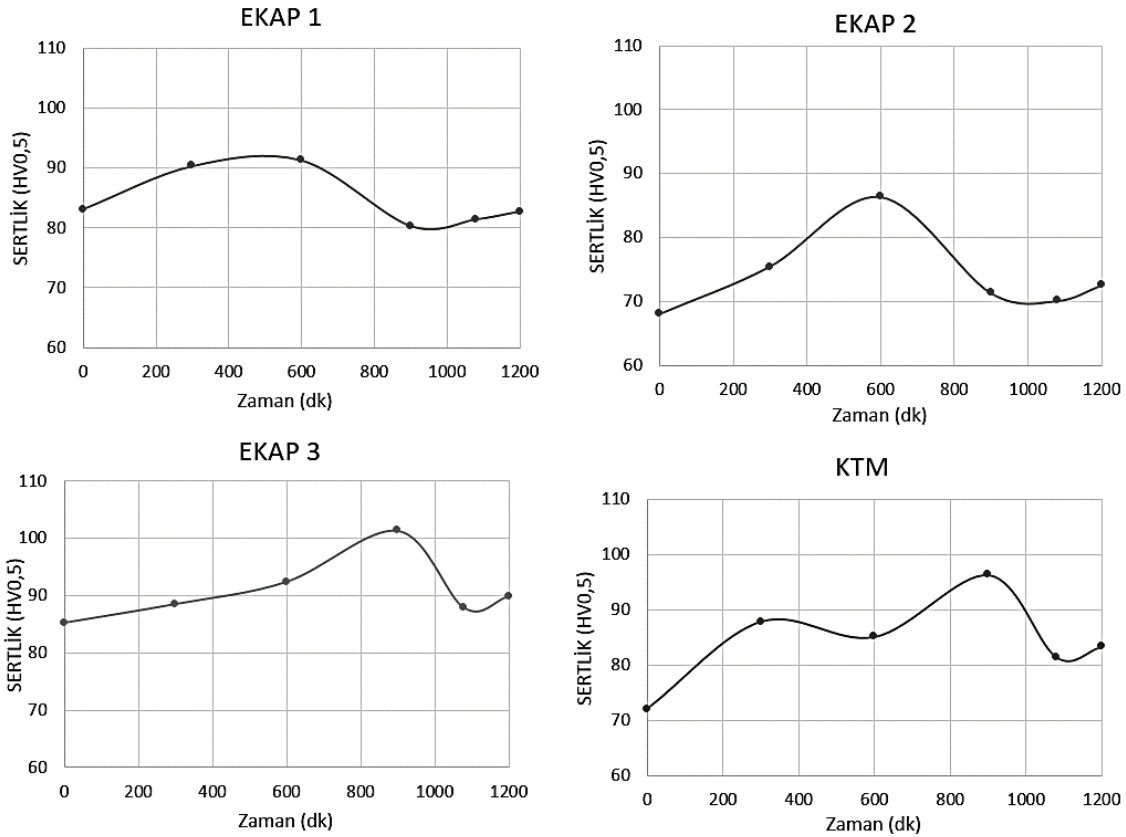
yüksek dayanıma ulaşmasında tekrarlı paslarla artan dislokasyon yoğunluğuna karşın bu dislokasyonların kesme düzlemleri ile hareketinin engellenmesi ve bunun

Çizelge 3. Isıl işlemler öncesi ve sonrası mikro sertlik sonuçları ve standart sapmaları (Micro-hardness results and standard deviations before and after heat treatments)

Mikro sertlik ölçümleri (HV0,5)			
Numune	Ham	Sinterleme	4 Saat Çözündürme
EKAP1	68,38 ±8,86	52,97 ±3,91	80,67 ±7,45
EKAP2	60,59 ±8,65	58,50 ±2,51	68,55 ±8,93
EKAP3	58,86 ±1,61	50,59 ±4,38	82,48 ±4,87
KTM	61,83 ±2,83	48,54 ±5,04	72,03 ±7,11

Çözündürme işlemlerinin ardından malzemeler 5+5+5+3+2 saatlik zaman dilimlerinde 190°C'de yaşlanırlmışlardır. Bu zaman dilimleri arası sürekli olarak mikro sertlikleri ölçülmüş ve pik zamanı belirlenmeye çalışılmıştır. Malzemelerin yaşlanma

sonucunda da aşırı plastik deformasyona maruz bırakılan malzemenin mikro sertliğinde artış meydana getirmesinin etkisi oluğu düşünülmektedir. Literatürde de EKAP ile Al ve alaşımlarının; mekanik özelliklerinin artırıldığı pek çok araştırmacı tarafından vurgulanmaktadır [5, 10, 11]. Ancak tüm bu çalışmalar



Şekil 8. Malzemelerin 20 saat sonunda yaşlanma grafikleri (Ageing graphs of the materials after 20 hours)

eğrilerinin grafikleri Şekil 8'de verilmiştir

Şekil 8'de görüldüğü üzere EKAP1 ve EKAP2 malzemeleri 10 saat, EKAP3 ve KTM malzemeleri ise 15 saat sonucunda yaşlanmışlardır. Bu malzemelerin pik mikro sertlikleri ise sırasıyla 91,3, 86,3, 101,3 ve 89,4'tür. En yüksek mikrosertliğe ulaşan malzeme EKAP3 olmuştur. 200°C'de 8 pas ile üretilen EKAP malzemesinin diğerlerinden daha

genelde ingot ticari Al alaşımlarının EKAP kalıbına uyacak kesite indirgenip preslenmesi ile gerçekleştirilirken bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak Al ve Cu tozları ön karıştırma ile hazırlanıp, EKAP kalıbına ilave edilerek direkt olarak üretim yapılmıştır. Yaşlandırılabilir Al-Cu alaşımının EKAP ile üretilmesi açısından tüm bu sonuçlar umut vadeci olarak düşünülmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada 3 tip malzeme üretilmiştir ve tüm malzemelerin kütlece bileşimi Al-%4Cu olacak şekilde tozları ön karıştırma ile hazırlanmıştır. EKAP işlemi ile üretilen malzemelerin ilkinde, EKAP1, kalıba doldurulan tozlar 200°C'ye kadar ısıtılıp bir saat beklenmiş ardından 4 pas yapılarak üretilmiştir. İkinci malzeme olan EKAP2'de yine kalıba dökülen tozlar önce 200°C'ye kadar ısıtılmış bir saat beklenmiş ve 4 pas gerçekleştirilmiş ardından 500°C'ye ısıtılmış 1 saat daha beklenmiş ve sonrasında da 200°C'ye soğumasının ardından 4 pas daha gerçekleştirilmiştir. Son olarak EKAP ile üretilen EKAP3, tozlar EKAP kalıbına döküldükten sonra 200°C'de 1 saat beklenmiş sonrasında 8 pas ile işleme devam edilmiştir. Klasik toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen diğer malzemelerde de aynı kütlece bileşimle 200°C'de üretim gerçekleştirilmiştir.

Daha sonra tüm malzemeler 600°C'de 2 saat sinterlenmiş bu malzemelerin birer numunesi 4 saat 550 °C'de çözün-dürme işlemine tutulmuştur. Son olarak malzemeler 5, 5, 5, 3 ve 2 saatlik zaman periyotlarında yaşlandırılmış ve pik sertliği bulunmuştur.

EKAP işleminin toz alaşımlandırma proseslerinde kullanımının sonuçları umut vaadedicidir. Isıl işlemler (yaşlandırma hariç) malzemelerin gerçek yoğunluklarında bariz bir değişim gerçekleşmemiştir. EKAP ve KTM yöntemlerinde 4 saat çözündürme sonrası malzemelerde ortalama %94 oranında yoğunlaştırma sağlanmıştır. En kararlı yoğunluk değerleri EKAP2 malzemesinde aittir. KTM ile üretilmiş malzemenin yoğunluğu, 4 saat çözündürme işlemi sonrasında EKAP ile üretime göre %4 daha azdır. Sinterleme işlemleri sonrası malzemelerde herhangi bir termal çarpılma gerçekleşmemiştir. Ham EKAP2 malzemesinde ve dört saat çözündürülmüş EKAP1 malzemesinde Al/Cu intermetaliklerine rastlanmıştır. KTM ile üretilmiş malzemelerde EKAP ile üretilenlere göre çözündürme ve sinterleme işlemi çok daha kritik önem arz etmektedir. Ham malzemelerin mikrosertlikleri arasında belirli bir fark görülmezken dört saat çözündürme işlemi sonunda en yüksek mikro sertliğe ulaşan malzeme EKAP3'tür. Dört saat çözündürme işlemi ile 190 °C'de 15 saat uygulanan yaşlandırma işlemi sonrası en yüksek sertlik 101,3 HV ile EKAP3 malzemesine aittir. EKAP işleminin mikro sertlik üzerine olumlu etkisi bulunmaktadır ve KTM ile üretime göre daha yüksek mikro sertlikler elde edilmiştir. Yaşlanma eğrisi tüm malzemelerde 10 ile 15 saatler arasında gerçekleşmiştir.

REFERANSLAR (REFERENCES)

- [1] Sabirov, I., Murashkin, M.Y., Valiev, R.Z., "Nanostructured Aluminium Alloys Produced by Severe Plastic Deformation: New Horizons in Development", *Materials Science & Engineering A*, 560:1-24 (2013).
- [2] Gökçe, A., Fındık, F., Kurt, A.O., "Microstructural Examination and Properties of Premixed Al-Cu-Mg

- Powder Metallurgy Alloy", *Materials Characterization*, 62:730-735 (2011).
- [3] Roshan, M.R., Jenabali, Jahromi, S.,A., Ebrahimi, R., "Predicting the Critical pre-Aging Time in ECAP Processing of Age-Hardenable Aluminium Alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 509:7833-7839 (2011).
- [4] Goodarzy, M.H., Arabi, H., Boutorabi, M.A., Seyedein, S.H., Hasani Najafabadi, S.H., "The Effects of Room Temperature ECAP and Subsequent Aging on Mechanical Properties of 2024 Al Alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 585:753-759, (2014).
- [5] Furukawa M., Horita Z., Nemoto M., Langdon T.G., "Review Processing of Metals by Equal-Channel Angular Pressing", *Journal of Materials Science*, 36:2835-2843 (2001).
- [6] Aslan, Ateş, E., "Toz Metalurjisi ile Üretilen AA2014-AL4C3 Sistemlerine Yaşlandırma Isıl İşleminin Uygulanması ve Mikroyapısal Özelliklerinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 87-88, (2012).
- [7] Du, Y., Chang, Y.A., Huang, B., Gong, W., Jin, Z., Xu, H., Yuan, Z., Liu, Y., He, Y., Xie, F.Y., "Diffusion Coefficients of Some Solutes in fcc and Liquid Al: Critical Evaluation and Correlation", *Materials Science and Engineering, A* 363:140-151 (2003).
- [8] Apelian, D., "Particulate Processing (Powder Metallurgy)", Editors: Buschow, K., H., J., Cahn, R., W., *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Vol.7, *Elsevier Science Ltd.*, United Kingdom, 6761-6769 (2001).
- [9] Chen, Y.J., Chai, Y.C., Roven, H.J., Gireesh, S.S., Yu, Y.D., Hjelen, J., "Microstructure and Mechanical Properties of Al-xMg Alloys Processed by Room Temperature ECAP", *Materials Science and Engineering A*, 545: 139-147 (2012).
- [10] Franko, İ., "Eş Kanallı Açılı Presleme ile Aşırı Plastik Deformasyon Uygulanan 2024 Alüminyum Alaşımının Yaşlandırılması", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-3, 9 (2007).
- [11] Kim, X.J., Chung, C.S., Ma, D.S., Hong, S.I., Kim, H.K., "Optimization of Strength and Ductility of 2024 Al by Equal Channel Angular Pressing (ECAP) and post-ECAP Aging", *Scripta Materialia*, 49:333-338 (2013).
- [12] Mani, B., Jahedi, M., Paydar, M.,H., "Consolidation of Commercial Pure Aluminum Powder by Torsional-Equal Channel Angular Pressing (T-ECAP) at Room Temperature", *Powder Technology*, 219:1-8 (2012).
- [13] Kotan, G., Tan, E., Kalay, Y.E., Gür, C.H., "Homogenization of ECAPed Al 2024 Alloy through Age-Hardening", *Materials Science & Engineering A*, 559:601-606 (2013).
- [14] Xu, X., Liu, Z., Li, Y., Dang, P., Zeng, S., "Evolution of Precipitates of Al-Cu Alloy During Equal-Channel Angular Pressing at Room Temperature", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 18:1047-1052 (2008)

Cholesteryl Octanoate Tek Kristalinde Işınlama ile Oluşan Radikalin ESR Tekniği Kullanılarak Belirlenmesi

Ülkü SAYIN^{1,2*}, Sami BÜYÜKÇELEBİ², Ayhan ÖZMEN^{1,2}

¹Selçuk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Konya, Türkiye

²Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi, Konya, Türkiye

(Geliş / Received : 11.01.2016 ; Kabul / Accepted : 30.03.2016)

ÖZ

Bu çalışmada tıbbi öneme sahip Cholesteryl octanoate ($C_{35}H_{60}O_2$) kolesterol esterinde gama ışınlamasının oluşturduğu radikaller ESR tekniği ile tespit edildi. Etanol çözeltisinde kristallendirilen örnekler $^{60}Co-\gamma$ kaynağı ile ışınladı ve ışınlama öncesi diyamanyetik özellik taşıyan moleküllerin ışınlama sonrası paramanyetik hale geldiği belirlendi. ESR spektrumları Selçuk Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi'nde bulunan JEOL JESFA-300 X-band ESR spektrometresi ile tek kristalin birbirine dik üç ekseninde 10° aralıklarla, farklı mikrodalga güçlerinde ve farklı sıcaklıklarda kaydedildi. Cholesteryl octanoate molekülünün kimyasal yapısı ve ESR spektrumları göz önüne alınarak radyasyonun örneklerin yapısında kararlı ve uzun ömürlü $R-\dot{C}H_{30}CH_6CH_{27}$ radikali oluşturduğu tespit edildi. Manyetik alan içinde yönelime bağlı anizotropik özellik taşıyan radikalin spektroskopik yarımla çarpanı değerleri ve aşırı ince yapı sabitleri elde edildi. Ayrıca tespit edilen radikal için ESR simülasyonu yapıldı ve deneysel spektrumlarla uyum gözlemlendi.

Anahtar Kelimeler: Elektron Spin Rezonans (ESR), Kolesterol, Cholesteryl octanoate, paramanyetik merkez, Gama ışınlaması

Determination of Radicals Produced by Irradiation in Cholesteryl Octanoate Single Crystals Using ESR Technique

ABSTRACT

In this study, the radicals produced by gamma irradiation was determined using ESR technique in cholesteryl octanoate ($C_{35}H_{60}O_2$), a cholesterol ester, which has medical importance. The samples that crystallized in ethanol solution were irradiated with $^{60}Co-\gamma$ source. The molecules that have diamagnetic property become paramagnetic after irradiation. ESR spectra were recorded in different microwave powers and different temperatures at 10° intervals in the magnetic field applied along each of the perpendicular axes using JEOL JESFA-300 X-band ESR spectrometer located in Selçuk University Advanced Technology Research and Application Center. By considering the chemical structure and ESR spectra of Cholesteryl octanoate molecule, it was identified that radiation produced stable and long lived radical, $R-\dot{C}H_{30}CH_6CH_{27}$, in the sample. The hyperfine splitting and spectroscopic splitting values which have anisotropic property due the location of crystal in the magnetic field were obtained. In addition, simulations were made for identified radical and a good agreement was found with the experimental spectra.

Keywords: Electron Spin Resonance (ESR), Cholesterol, Cholesteryl octanoate, paramagnetic center, Gamma Irradiation

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Serbest radikaller; kanser, diyabetik hastalıklar, akciğer ve karaciğer bozuklukları, kas hastalıkları, göz hastalıkları, yaşlanma, bağ ve doku hastalıkları, hematolojik bozukluklar, hipertansiyon, infektif hastalıklar gibi ciddi hastalıkların nedenidir. Serbest radikallerin insan hayatındaki önemi, bu radikallerin tespit edilmesini, manyetik özelliklerinin ve oluşturdukları etkilerin araştırılmasını zorunlu hale getirmiştir. Temelinde manyetik rezonans kavramı yatan Elektron Spin Rezonans (ESR) tekniği çiftlenimsiz elektronların manyetik alan içindeki yönelimini ve

mikrodalga enerji bölgesindeki geçişlerini inceleyen ve radikal tespitinde kullanılan tek yöntemdir [1].

Kolesterol hücre zarlarının inşası ve bakımı için tüm vücutta yaygın olarak bulunan yaşam için gerekli yağmı bir maddedir. Kolesterol ve kolesterol esterlerinin özellikleri bu moleküllerin biyolojik mekanizmalardaki işlevi nedeniyle araştırmacıların ilgisini çekmiştir [2-5]. Biyolojik açıdan önemli olan bu maddelerin manyetik özelliklerinin tespit edilmesi amacıyla yapılan ESR çalışmalarında radyasyonun kolesterol esterlerinde kararlı sigma radikalleri oluşturduğu tespit edilmiştir [6-10].

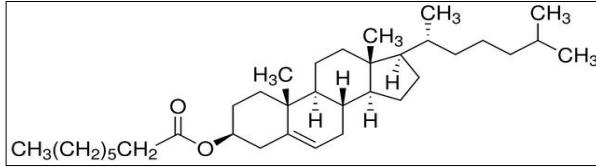
Bu çalışmada tıbbi öneme sahip cholesteryl octanoate tek kristallerinde radyasyonun oluşturduğu radikaller

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: uakpinar@selcuk.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 343-348

ESR tekniği ile tespit edildi ve özellikleri belirlendi. Şekil 1’de moleküler yapısı verilen cholesteryl octanoate kolesterol esterini tıpta katı gıdaların mideden ince bağırsak içine hangi hızda geçtiğini belirlemek için kullanılmaktadır. ¹³C-Oktanoik Asit Nefes Testi olarak bilinen bu test genellikle şeker hastalığı ile ilişkili bir durum olan katı gıdaların gecikmiş gastrik boşaltılmalarını teşhis eder ve daha fazla invaziv olan radyoaktif prosedüre iyi bir alternatiftir [11-13].



Şekil 1. Cholesteryl octanoate moleküler yapısı (The molecular structure of cholesteryl octanoate)

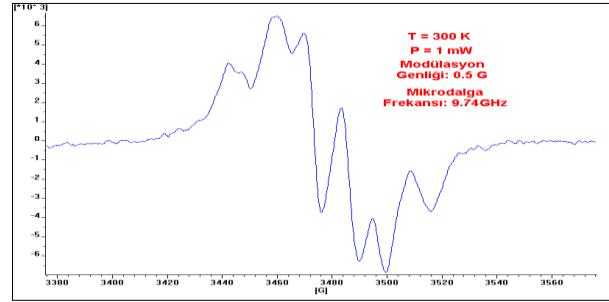
DENEYSSEL (EXPERIMENTAL)

Toz halde Sigma-Aldrich’den satın alınan ve etanol çözeltisinde yavaş buharlaşmayla 1 haftada kristallenen cholesteryl octanoate örneğinin tek kristalleri, renksiz ve dikdörtgenler prizması biçiminde oluşmuştur. Elde edilen kristaller Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi-(SANAEM)’de bulunan doz hızı 0,99 kGray/saat olan Cell Px-γ-30 “ISSLODOVATEL” kaynağıyla oda sıcaklığında toplam 110 kGy doz olacak şekilde ışınıldı. Işınlama sonrası kristallerin rengi değişmedi.

ESR spektrumları Türkiye Atom Enerjisi Kurumu (TAEK) ESR Laboratuvarında bulunan Bruker EMX-081 model X-band ESR spektrometresi ile farklı sıcaklıklarda ve farklı mikrodalga güçlerinde tek kristalin birbirine dik üç ekseninde 10° açı aralıkları kaydedildi. Paramanyetik merkezin tayini için 120 K sıcaklığında kaydedilen spektrumlar esas alındı. Eksen çalışmalarında kullanılan spektrometre parametreleri 1 mW mikrodalga gücü, 9,41 GHz mikrodalga frekansı, 100 kHz modülasyon frekansı, 3354 G merkez alanı, 156 G tarama alanı ve 2 G modülasyon genliği şeklindedir. Spektrumlardaki ESR piklerinin manyetik alan içindeki yönelimleri EPRES (*EPR Resolution Program*) programı ile belirlendi [14].

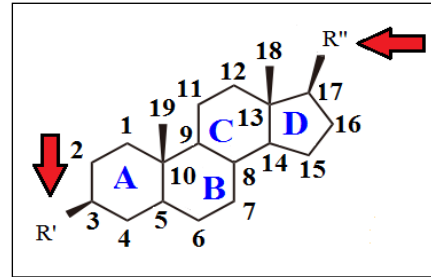
SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Kimyasal yapısı Şekil 1’ de verilen cholesteryl octanoate (C₃₅H₆₀O₂) kolesterol esterinin moleküler ağırlığı 512,86 g/mol ve erime noktası 110 °C değerindedir. Işınlamadan önce diyamanyetik özellik taşıyan cholesteryl octanoate toz örneğinde ışınlama sonrası paramanyetik merkezler oluştuğu tespit edildi. Şekil 2’ de 1 mW mikrodalga gücü ve oda sıcaklığında kaydedilen toz ESR spektrumu gösterildi.



Şekil 2. Cholesteryl octanoate toz örneğinin ESR spektrumu (ESR spectrum of cholesteryl octanoate powder sample)

Kolesterol türevlerinin moleküler yapısı oldukça büyüktür. Şekil 3’ de gösterildiği gibi A, B, C ve D benzen halkası gruplarına farklı R’ ve R’’ molekül grupları bağlanır ve farklı kolesterol türevleri oluşur. Farklı esterler için bu halkalara bağlanan hidrojen sayıları da farklı olabilir.



Şekil 3. Kolesterol türevlerinin genel moleküler yapısı (General molecular structure of cholesterol derivatives)

Kolesteroler çoğunlukla manyetik momente sahip olan yapılar değildir yani diyamanyetik özellik taşırlar. Ancak kolesterol molekülleri gama radyasyonuna maruz kalırlarsa kimyasal bağları oluşturan çiftlenmiş elektronlardan biri uzaklaşarak tek elektrona sahip serbest radikaller meydana gelir. Kolesterolerde oluşan bu serbest radikaller uzun ömürlü ve yüksek konsantrasyona sahipse çok zararlı yapısal bir hasar olduğu anlamına gelir. Kolesterol ve türevleri halkalı yapıya sahip ve radyasyona karşı yüksek duyarlılık gösteren yapılardır. Gama radyasyonuna maruz kalan kolesterol moleküllerinde uzun ömürlü serbest radikallerin oluşması ile ilgili çok sayıda çalışma vardır. X-ışınlarıyla ışınlanmış bazı lipid, hormon ve vitaminlerin toz ESR spektrum analizleri ilk kez 1959 yılında Rexroad ve Gordy tarafından yapılmış ve kararlı radikaller oluştuğu tespit edilmiştir. Rexroad ve Gordy ışınlanmış kolesterol tozlarında 3 protondan kaynaklanan bir triplet ve bunları yaran bir dublet olduğunu gözlemişlerdir [6].

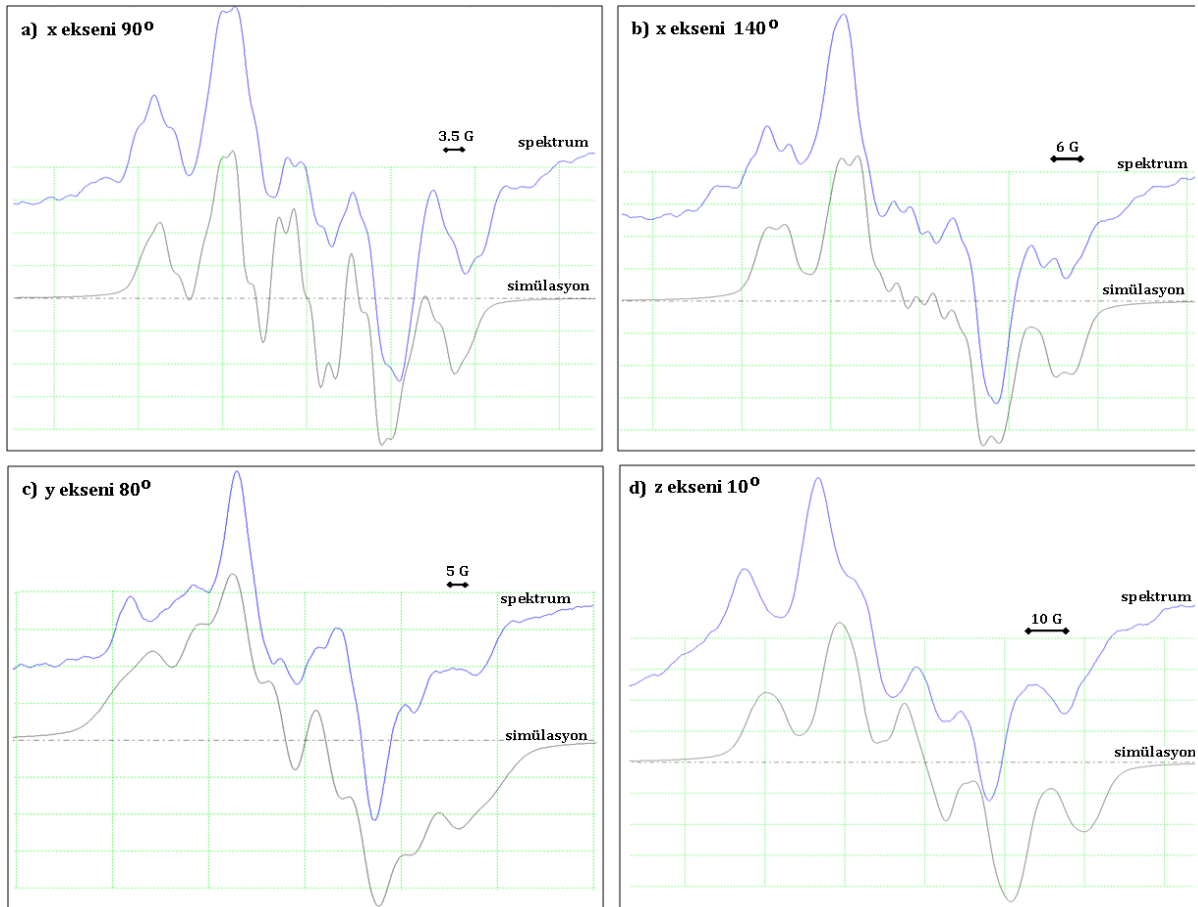
Cholesteryl octanoate kristalinin moleküler yapısı, farklı mikrodalga güçlerinde ve farklı sıcaklıklarda kaydedilen ESR spektrumları ve üç eksende 10° aralıklarla alınan toplam 57 ESR spektrumları incelendiğinde iyonize radyasyonun moleküler yapıda tek radikal oluşturduğu ve bu radikalın $R-\dot{C}H_3\alpha CH_2\beta CH_2\gamma$ moleküler yapısında olduğu tespit edildi. Radikale ait çiftlenimsiz elektron ile üç farklı hidrojen grubu arasında aşırı ince yapı etkileşmesi olduğu belirlendi. Manyetik eşdeğer üç alfa hidrojeni nedeniyle 1:3:3:1 şiddet oranında ortaya çıkan ESR piklerinin her biri beta hidrojeni nedeniyle 1:1 şiddet oranında ikiye yarıldı. Bu pikler ise özdeş iki gama hidrojeni nedeniyle 1:2:1 şiddet oranında tekrar yarıldı. Cholesteryl octanoate tek kristalinin ESR spektrumlarının manyetik alanın yönelimine bağlı olarak değiştiği ve spektroskopik yarıma çarpanı, g , ve aşırı ince yapı sabiti, a , değerlerinin anizotropik özellik gösterdiği tespit edildi. Buna göre her üç eksende alınan spektrumlarda alfa ve beta hidrojenlerinin aşırı ince yapı sabitleri hesaplandı ve tensör oluşturularak izotropik ve anizotropik değerler belirlendi. Bazı açılarda piklerin üst üste gelerek zarf oluşturması nedeniyle gama hidrojenlerine ait aşırı ince yapı sabiti her üç eksende ölçülemedi ve yaklaşık değeri elde edildi.

Kristal yapıda ışınlama ile oluşturduğu düşünülen radikalın deneysel olarak ölçülen g değerleri ve aşırı ince yapı

sabitleri kullanılarak ESR spektrumları simüle edildi. Simülasyon için JEOL izotropik simülasyon programı kullanıldı. Şekil 4' de farklı eksenlerde ve açılarda $120K$ sıcaklığı, $1mW$ mikrodalga gücü, $3354G$ merkez alanı, $156G$ tarama alanı ve $2G$ modülasyon genliğinde kaydedilen ESR spektrumları ve bu spektrumlar için yapılan simülasyon sonuçları gösterildi. Simülasyon çalışmaları deneysel olarak tespit edilen radikalın ve hesaplanan ESR parametrelerinin doğruluğunu görmek amacıyla yapıldı. Her spektrum için yapılan simülasyonlarda kullanılan aşırı ince yapı sabitleri Tablo 1' de verildi. Yapılan simülasyonlar ile kaydedilen spektrumlar arasındaki uyum radikal tespitinin ve ölçülen ESR parametrelerinin doğru olduğunu desteklemektedir.

Çizelge 1. Şekil 4' deki simülasyonların aşırı ince yapı sabitleri (Hyperfine splitting values of simulations given in Figure 4)

Şekil 4a	$a_{(CH_3)} = 28G$, $a_{(CH)} = 16 G$, $a_{(CH_2)} = 6 G$
Şekil 4b	$a_{(CH_3)} = 26G$, $a_{(CH)} = 13 G$, $a_{(CH_2)} = 7 G$
Şekil 4c	$a_{(CH_3)} = 27G$, $a_{(CH)} = 11 G$, $a_{(CH_2)} = 11 G$

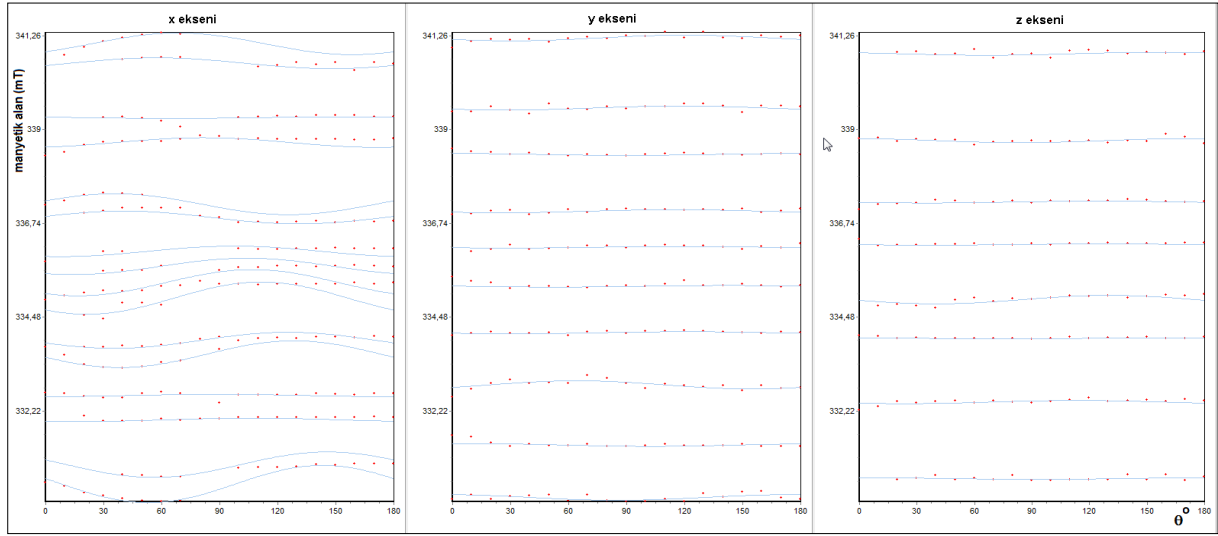


Şekil 4. Işınlanmış Cholesteryl octanoate kristalinin farklı eksen ve açılarda ESR spektrum ve simülasyonları (ESR spectra and simulations of irradiated cholesteryl octanoate single crystals in different axes)

Şekil 4d

$$a_{(CH_3)} = 31 \text{ G}, \quad a_{(CH)} = 17 \text{ G}, \quad a_{(CH_2)} = 8 \text{ G}$$

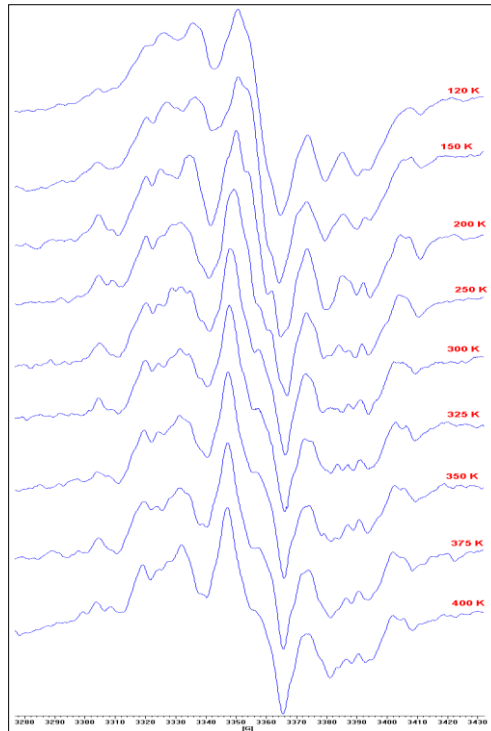
Radikalin sıcaklığa bağlı değişimini incelemek üzere ESR spektrumları farklı spektrometre sıcaklıklarında



Şekil 5.Cholesteryl octanoate tek kristalinin ESR spektrumuna ait pik takibi (EPRES) (EPRES graphics of cholesteryl octanoate single crystal)

Radikal tespiti ve/veya tespit edilen radikalin doğrulanması için ESR spektrumunda ortaya çıkan piklerin manyetik alana bağlı davranışlarını belirlemek gerekebilir. Bu çalışmada cholesteryl octanoate tek kristalinin spektrumuna ait piklerin manyetik alana bağlı değişimlerini anlamak üzere EPRES programı kullanılarak pik takibi yapıldı [14], EPRES'te çizdirilen pikler Şekil 5'te gösterildi. Yalnızca bazı açılarda gözlenen ve sinyal şiddeti zayıf olan pikler karışıklığa sebep olmamak için gösterilmedi. Bu piklerin varlığı yapılan simülasyonlarla doğrulandı.

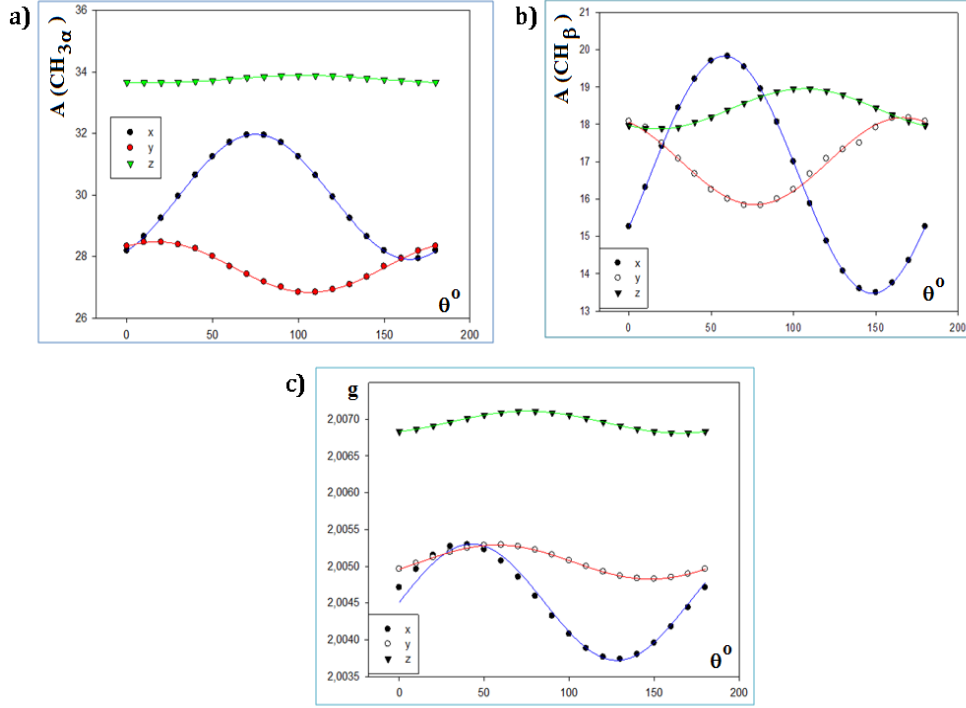
kaydedildi. Bu spektrumlar incelendiğinde radikale ait aşırı ince yapı sabiti değerlerinin ve g faktörlerinin sıcaklığa bağlılık göstermediği, radikalin 400 K sıcaklığına kadar kararlı kaldığı ve ışılama ile yapıda yalnızca tek radikal türü olduğu belirlendi. Ayrıca 120 K sıcaklığında kaydedilen ESR spektrumunda piklerin sinyal şiddetinin oda sıcaklığına göre daha büyük ve gürültü piklerinin daha zayıf olduğu gözlemlendi, buna göre radikale ait ESR spektrumunun en iyi gözlemlendiği sıcaklığın 120 K sıcaklığı olduğu anlaşıldı ve tek kristal çalışmaları bu sıcaklıkta yapıldı. Şekil 6' da farklı



Şekil 6. Cholesteryl octanoate kristali x eksen 0° farklı sıcaklıklarda ESR spektrumları (ESR spectra of cholesteryl octanoate crystal at x axis 0° in different temperatures)

sıcaklıklarda kaydedilen ESR spektrumları gösterildi. Alfa ve beta hidrojenleri için her bir açıda hesaplanan aşırı ince yapı sabitleri ve g değerleri kullanılarak hesaplanan anizotropik ve izotropik parametreler ve yön kosinüsleri Tablo 2' de, her bir ESR parametresi için

Tespit edilen $R-\dot{C}H_{3\alpha}CH_{\beta}CH_{2\gamma}$ radikali için deneysel olarak ölçülen g değerleri ve aşırı ince yapı sabitleri kullanılarak yapılan simülasyonlar ile kaydedilen spektrumlar arasındaki uyum radikal tespitini desteklemektedir. $R-\dot{C}H_{3\alpha}CH_{\beta}CH_{2\gamma}$ radikali için hesaplanan değerler literatürde var olan benzer yapılar



Şekil 7. $R-\dot{C}H_{3\alpha}CH_{\beta}CH_{2\gamma}$ radikaline ait ESR parametrelerinin açıya bağlı değişimleri (Orientation dependence of $R-\dot{C}H_{3\alpha}CH_{\beta}CH_{2\gamma}$ radical ESR parameters)

Çizelge 2. Cholesteryl octanoate kristalinde $R-\dot{C}H_{3\alpha}CH_{\beta}CH_{2\gamma}$ radikalinin ESR parametreleri (ESR parameters of $R-\dot{C}H_{3\alpha}CH_{\beta}CH_{2\gamma}$ radical in cholesteryl octanoate crystal)

ESR parametreleri	Esas Eksen Değerleri	Yön Kosinüsleri		
$A(CH_{3\alpha})$	$A_{xx} = 32.9$ G	0.0092	-0.9941	-0.1081
	$A_{yy} = 31.3$ G	0.9821	0.0293	-0.1861
	$A_{zz} = 27.3$ G	0.1882	-0.1044	0.9766
	$a_{ort} = 30.5$ G			
$A(CH_{\beta})$	$A_{xx} = 19.9$ G	0.3299	0.9423	0.0563
	$A_{yy} = 18.3$ G	-0.7796	0.3056	0.5467
	$A_{zz} = 13.5$ G	-0.5324	0.1365	0.8354
	$a_{ort} = 17.2$ G			
$A(CH_{2\gamma})$	$a_{ort} \approx 9$ G	a değeri bütün açılarda ölçülemediği için yön kosinüsleri hesaplanmadı.		
g	$g_{xx} = 2.0062$	0.6641	-0.7428	-0.0845
	$g_{yy} = 2.0059$	0.5952	0.5938	-0.5414
	$g_{zz} = 2.0044$	0.4523	0.3093	0.8365
	$g_{ort} = 2.0055$			

açıya bağlı değişim grafikleri ise Şekil 7' de gösterildi.

ile uyum içindedir [7-9, 15-23]. Ayrıca, bu ESR çalışmasıyla biyolojik ve tıbbi öneme sahip cholesteryl

octanoate molekülünde radyasyonun etkisiyle oluşan radikalin özellikleri ilk kez incelendi.

REFERANSLAR (REFERENCES)

- 1) J.A. Weil, J.R. Bolton, and J.E. Wertz, **John Wiley and Sons Inc., USA**, 471-515 (1993)
- 2) S.C. Goheen, L.J. Lis, J.W. Kauffman, **Chem. Phys. Lipids**, 20, 253-262 (1977)
- 3) R. Faiman, K.Larsson, **J.Raman. Spectrosc.**, 5, 3-7 (1976)
- 4) D. Di Vizio, K.R. Solomon and M.R. Freeman, **Tumori**, 5, 633-639 (2008)
- 5) E.Ikonen, **Nature Rev. Mol. Cell Biol.**, 9, 125-138 (2008)
- 6) H.N. Rexroad and W.Gordy, **Proc. Nat. Acad. Sci. USA**, 45, 256-269 (1959)
- 7) R.Krzyminiewski, J. Pietrzak, and R.Konopka, **J. Mol. Struct.**, 240, 133-140 (1990)
- 8) A.Szyczewski, J. Pietrzak and K.Möbius, **Acta Phys. Pol. A**, 108(1), 119-126 (2005)
- 9) B.T. Yiğit, A. Özmen, İ. Ercan, M. Eken, M. Birey, **Rad. Eff. Def.** 158, 833-837 (2003)
- 10) U. Sayin, O.Dereli, E.Turkkan, **J. Mol. Struct.**, 1007, 179-184 (2012)
- 11) Y.F. Ghoos, B.D. Maes, B.J. Geypens, G.Mys, M.I.Hielf, P.J. Rutgeerts, G. Vantrappen, **Gastroenterology**, 104, 1640-1647 (1993)
- 12) B.Pfaffenbach, M.Wegener, R.J. Adamek, H.Wissuwa, J.Schaffstein, S.Aygen and O. Hennemann, **Z.Gastroenterol.** 33(3), 141-5 (1995)
- 13) M.Ventrucci, A. Cipolla, G.M. Ubalducci, A.Roda and E.Roda, **Gut**, 42, 81-87 (1998)
- 14) R. Bıyık, M.Çemberci and R. Tapramaz, **Spectroscopy Letters**, 42, 8, 436-441 (2009)
- 15) C.L. Sevilla, D. Becker and M.D. Sevilla, **J. Phys.Chem.**, 90(13), 2963-2968 (1986)
- 16) R.Krzyminiewski, J. Masiakowski, J.Pietrzak and A. Szyczewski, **J. Magn. Res.**, 46, 300-305 (1982)
- 17) R. Krzyminiewski, A.M. Hafez, J. Pietrzak and A. Szyczewski, **J.Magn. Res.**, 51(2), 308-312 (1983)
- 18) R. Krzyminiewski, A.M. Hafez, A. Szyczewski and J. Pietrzak, **J.Mol.Struct.**, 160, 127-133 (1987)
- 19) A.M. Hafez, R.Krzyminiewski, A.Szyczewski and J. Pietrzak, **J. Mol.Struct.**, 130, 301-307 (1985)
- 20) A.Szyczewski, R. Krzyminiewski, A.M.Hafez and J.Pietrzak, **Int. J. Radiat. Biol.**, 50(5), 841-852 (1986)
- 21) A.Szyczewski and R. Krzyminiewski, **Organic Free Radicals**, H. Fischer, H. Heimgarten (Eds), p.201. Springer, Berlin (1988)
- 22) A.Szyczewski, B. Endewardand, K. Möbius, **Appl. Radiat. Isot.**, 49, 1-2, 59-65 (1998)
- 23) B. Çaliskan, E.Aras, B. Aşık, M.Büyüm, M. Birey, **Rad. Eff. Def.**, 159, 1-5 (2004)

AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğinin Sert Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğünün Deneysel Optimizasyonu

Mustafa KARABATAK¹ Fuat KARA*²

¹Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, DÜZCE

²Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, DÜZCE

(Geliş / Received : 14.01.2016 ; Kabul / Accepted : 24.02.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında kesme parametrelerinin performansları araştırılmış ve optimum işleme şartları tespit edilmiştir. Tornalama deneyleri Taguchi L₉ orthogonal (dikey) dizinine göre yapılmış, deney sonuçlarının değerlendirilmesinde sinyal/gürültü (S/N) oranı esas alınmıştır. Taguchi metodu kullanılarak optimum yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerini veren kontrol faktörleri belirlenmiştir. Kontrol faktörleri olarak üç farklı kesme hızı (50, 100, 150 m/dak), üç farklı ilerleme hızı (0,08, 0,16, 0,24 mm/dev) ve üç farklı kesme derinliği (0,25, 0,50, 0,75 mm) seçilmiştir. Deneysel sonuçlar kullanılarak yapılan Varyans analizi (ANOVA) ile kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etki seviyeleri belirlenmiştir. Son olarak doğrulama deneyleri yapılmış ve optimizasyonun başarıyla uygulandığı görülmüştür. Taguchi analizi sonucu, 100 m/dak kesme hızı, 0,08 mm/dev ilerleme hızı ve 0,25 mm kesme derinliği değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Bu kesme şartları için hesaplamalar ve doğrulama deneyleri sonucu Ra değerleri sırasıyla 0,280 µm ve 0,245 µm olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: AISI D2, Sert tornalama, Taguchi yöntemi, Varyans analizi, Yüzey pürüzlülüğü

Experimental Optimization of Surface Roughness in Hard Turning of AISI D2 Cold Work Tool Steel

ABSTRACT

In this study, performance of the cutting parameters that used in hard turning process of AISI D2 cold work tool steel have been researched and the optimum machining conditions have been identified. Experiments have been made according to Taguchi L₉ orthogonal array. The evaluation of the experimental results was based on the signal/noise (S/N) ratio. Control factors that given optimum surface roughness values were determined by using the Taguchi method. Three different cutting speeds (50, 100, 150 m/min), feed rates (0.08, 0.16, 0.24 mm/rev) and depth of cuts (0.25, 0.50, 0.75 mm) as control factors have been selected. The effect levels on the surface roughness of the control factors with analysis of variance (ANOVA) performed using the experimental results were determined. Finally, the confirmation tests were performed and showed that the optimization is successfully implemented. As a result Taguchi analysis, it was found the optimum results for surface roughness in cutting speed of 100 m/min, feed rate of 0.08 mm/rev and depth of cut 0.25 mm. The results of calculations and confirmation tests, the Ra values were found as 0.280 µm and 0.245 µm, respectively.

Keywords: AISI D2, Hard turning, Taguchi method, Analysis of variance, Surface roughness

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Soğuk iş takım çelikleri; 200°C'nin altında çalışan metalleri, şekillendirmek ve kesmek için üretilen kalıpların ve takımların imalatında kullanılan malzeme grubudur. Yüksek aşınma direnci, yüksek çatlama direnci, yüksek tokluğa ve yüksek sertleştirilme kabiliyetine sahip AISI D2 soğuk iş takım çeliği işlenebilirliği ve şekillendirilmesi kolay olduğundan imalatta çok kullanılan bir malzemedir [1]. AISI D2 soğuk iş takım çeliği genel olarak plastik enjeksiyon kalıpları, kesme ve delme takımları, derin çekme ve ekstrüzyon takımları, ölçme takımları, soğuk çekme makaraları,

makas bıçakları, ağaç bıçakları, kesme bıçakları, diş tarakları, çapak alma kalıpları gibi kırılmaya maruz kalan elemanların imalatında kullanılır. Bu parçaların imalatında, ısıl işlemde meydana gelen kusurlar dikkate alınarak ısıl işlemde sonra alınmak üzere bir miktar işleme payı bırakılmaktadır [2]. Bırakılan bu paylar çoğu zaman taşlama ve tornalama gibi talaşlı imalat yöntemleri ile işlenmektedir. Taşlama işleminin yüksek maliyeti ve birçok geometriye uygulanmasındaki sınırlamalar, sertleştirilmiş çeliklerin işlenmesinde tornalama işlemini ön plana çıkarmıştır.

Sert tornalama işlemi, genellikle 40 ila 62 HRC arasında sertlikteki demir esaslı iş parçaları için düşük maliyetli, pozitif ekolojik etkilere sahip, yüksek verimlilikli bir örnek imalat sürecidir. Bu süreç dişliler, miller,

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: fuatkara@düzce.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 349-355

rulmanlar, kamlar, kalıp malzemeleri ve çeşitli motor ekipmanlarının imalatında popüler bir teknik haline gelmiştir [3]. Sert tornalama işlemi ile silindirik taşlama işlemi sonrasında elde edilen yüzey kalitesine ulaşmak mümkündür [4-6]. Bu tornalama işleminde taşlama kalitesinde bir yüzey pürüzlülüğünü yakalayabilmek için kesme parametrelerinin en uygun şekilde seçilmesi gerekmektedir. Deneysel olarak optimum şartları belirlemek için çok fazla işleme yapmak gerekir ve bu da hem zaman hem maliyet açısından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle, az sayıda deney ile optimum işleme şartlarını belirlemek için deneysel sonuçlara Taguchi, Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks), Yanıt Yüzey Metodu (Response Surface Methodology) Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) ve Genetik Algoritma (Genetic Algorithm) gibi farklı optimizasyon teknikleri uygulanmaktadır [7-9]. Bu tekniklerden biri olan Taguchi metodu; deney sayısını azaltması, üretim ve test maliyetlerini düşürmesinin yanı sıra optimum işleme koşullarının belirlenmesinde az sayıda deney ile maliyeti olabildiğince düşürerek minimum zaman aralığında basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım sunmaktadır [10-12]. Literatürde Taguchi metodunu içeren çok sayıda çalışma mevcuttur [13-16].

Yücel ve Günay [17], sert tornalama işleminde oluşan ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti değerleri için kesme şartlarını optimize etmişlerdir. Sert tornalama deneyleri Taguchi L_{18} dikey dizilimi ile dizayn edilmiştir. Kesme şartları (kontrol faktörleri) olarak kesici takım malzemesi (CBN, seramik), kesme hızı (50, 100, 150 m/dak), ilerleme hızı (0,05, 0,075, 0,1 mm/dev) ve kesme derinliği (0,25, 0,50, 0,75 mm) seçilmiştir. Kesme şartlarının optimum seviyeleri en küçük en iyi yaklaşımına göre hesaplanan sinyal/gürültü (S/N) oranları kullanılarak belirlenmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri CBN takım ile elde edilmiştir. Asıl kesme kuvveti için optimum kesme şartları A1 (seramik takım), B1 (V=50 m/dak), C1 (f=0,05 mm/dev) ve D1 (a=0,25 mm) olarak, ortalama yüzey pürüzlülüğü için ise A2 (CBN takım), B1 (V=50 m/dak), C3 (f=0,1 mm/dev) ve D1 (a=0,25 mm) olarak tespit edilmiştir. Kesme kuvveti üzerindeki en etkili parametre %74,50'lik oran ile kesme derinliği olurken, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametre ise %75,78 ile ilerleme hızı olmuştur. Şirin vd., [18] farklı sertlikteki (21, 48, 56 HRC) AISI D2 soğuk iş takım çeliğine, farklı kesme parametrelerinde (ilerleme hızı: 0,05, 0,10, 0,15 mm/dev; kesme hızı: 70, 90, 110 m/dak) simetrik yüzey frezeleme işlemi uygulamışlardır. Deneyler, Taguchi L_9 dikey dizilimine göre gerçekleştirilerek deney sonuçlarının değerlendirilmesinde S/N oranları kullanılmıştır. Taguchi optimizasyonu ile optimum yüzey pürüzlülüğü değerleri, 48 HRC sertliğindeki iş parçasının 0,05 mm/dev ilerleme hızında ve 70 m/dak kesme hızında işlenmesine karşılık gelen A2B1C1 seviyelerinde elde edilmiştir. ANOVA

analizine göre yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili faktörün %55,66 ile kesme hızı olduğu, bunu sırasıyla %25,57 ile ilerleme hızı ve %5,92'lik oran ile malzeme sertliğinin takip ettiği görülmüştür. Yapılan doğrulama deneyleriyle optimizasyonun %95 güven aralığında başa-rıyla uygulandığı görülmüştür. Sahoo [19], sertleştirilmiş AISI D2 çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü sonuçları üzerine Taguchi ve regresyon analizi uygulamıştır. Yüzey pürüzlülüğünün tahmini için oluşturulan model L_{27} ortogonal dizine göre tasarlanmıştır. Çalışma-da ayrıca, kesme parametrelerinin etki oranlarını belirlemek için varyans analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme hızı olduğu görülmüştür. Regresyon modelinde korelasyon katsayısı (R^2) 0,98 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar, D2 çeliğinin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için geliştirilen modelin % 95 güven aralığında olduğunu göstermiştir. Başka bir çalışmada Sharma vd., [20], farklı kesme hızı (51, 78, 123 m/dak), ilerleme (0,10, 0,15, 0,20 mm/dev) ve hava basıncı (5, 6, 7 bar) parametrelerinde AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin iki farklı minimum miktarda yağlama (MQL) tekniği ile tornalanmasındaki yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. Soğutma sıvısı olarak nano sıvılı (nanofluids) MQL ve standart MQL tekniği uygulanmıştır. Deney sayıları Taguchi L_{18} ortogonal dizinine göre 18 deney şeklinde belirlenmiştir. Deneysel optimizasyon sonucunda en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri; nano sıvılı MQL tekniğinde, 78 m/dak kesme hızı, 0,10 mm/dev ilerleme ve 6 bar basınçta yapılan deneyde ortalama 0,86 μ m olarak bulunmuştur.

Bu çalışmada, kalıp imalatında yaygın olarak kullanılan AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu amaçla deneyler Taguchi L_9 ortogonal dizinine göre tasarlanmış, yapılan optimizasyonla en düşük yüzey pürüzlülüğünü veren optimal kesme parametresi değerleri belirlenmiştir. Bununla birlikte varyans analizi ile kontrol faktörlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Son olarak yapılan doğrulama deneyleri ile optimizasyonun geçerliliği test edilmiştir.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Deney Numunesi ve Deney Düzenliği (Test Specimen and Experimental Setup)

Bu çalışmada, geleneksel ısıl işlem uygulanmış AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin kuru kesme şartları altında tornalanmasında kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri araştırılarak optimum işleme şartlarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Deneylerde kullanılan AISI D2 soğuk iş takım çeliği $\varnothing 61 \times 300$ mm ölçülerinde imal edilmiş olup kimyasal

Çizelge 1. AISI D2 çeliğinin kimyasal bileşimi (%) (Chemical composition of AISI D2 steel)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
1,575	0,32	0,30	0,024	0,0020	11,70	0,74	0,960

bileşimi Tablo 1’de verilmiştir.

Numunelerin ısıtma işlemi; öncelikle 450 °C’de 30 dk., 650 °C’de 60 dk., 850 °C’de 30 dk. ön ısıtma, 1030 °C’de 60 dk. östenitleme, vakumlu fırında 4 Bar basınçta azotta soğutma, 200 °C’de 180 dk. birinci temperleme ve son olarak 350 °C’de 180 dk. ikinci temperleme işlemine tabi tutularak gerçekleştirilmiştir. Geleneksel ısıtma işlemi sonrasında numuneler 60-62 HRC sertlik değerine getirilmiştir.

Deneylerde kullanılan CNC torna tezgahı GOODWAY GLS-1500 marka olup motor gücü 7,5 KW’dır. Sert tornalama deneylerinde, TaeguTec firmasından temin edilen SNGA120408 AB30 kodlu kaplamasız seramik kesici takımlar kullanılmıştır. Kesici takımlar, PSBNR 2020K12M kodlu takım tutucu ile torna tezgahına rijit bir şekilde bağlanarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

İşlenebilirlik çalışmalarında yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi ve değerlendirilmesi oldukça önemlidir. İşlenmiş yüzeylerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Tablo 2’de teknik özellikleri verilen Taylor Hobson Surtronic 25 marka yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. İşlenen yüzeylerden üç defa yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve bunların ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülük (Ra) değerleri

analiz edebilmek için S/N oranı olarak bilinen bir istatistiksel performans ölçüsü kullanılır. Deneylerden elde edilen sonuçlar sinyal/gürültü oranına (S/N) çevrilerek değerlendirme yapılır. S/N oranındaki S sinyal faktörünü, N ise gürültü faktörünü ifade etmektedir. Sinyal faktörü sistemden alınan gerçek değeri, gürültü faktörü ise deney tasarımına katılmayan fakat deney sonucuna etki eden faktörleri ifade etmektedir. Gürültü kaynakları, elde edilmek istenen performans karakteristiklerinin hedef değerden sapmasına sebep olan tüm değişkenlerdir [21]. S/N oranlarının hesaplanmasında; karakteristik tipine bağlı nominal en iyidir, en büyük en iyidir ve en küçük en iyidir metotları kullanılır [22]. Bu çalışmadaki S/N değerlerinin belirlenmesinde, işleme verimliliği bakımından Ra değerinin en küçük olması istenildiği için Eşitlik 1’de verilen “en küçük en iyi” prensibine karşılık gelen formül kullanılmıştır.

$$S/N = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

Burada; y_i ölçülen yüzey pürüzlülük değerini, n ise yapılan deney sayısını ifade etmektedir. Kesme parametreleri, kesme hızı (V), ilerleme miktarı (f) ve kesme derinliği (a) olarak seçilmiştir. AISI D2 soğuk iş

Çizelge 2. Yüzey pürüzlülük cihazına ait teknik özellikler (Technical specifications of surface roughness measurement device)

Ölçüm aralığı Z-X eksen	350µm – 25mm
Sürücü ünitesi hızı	Ölçüm 0,25 mm/s; 0,5 mm/s Geri hareket: 0,8 mm/s
Tarama metodu	Diferansiyel indüksiyon
Parametreler	Ra, Ry, Rz, Rt, Rp, Sm, S, Pc, R3z, mr , A1, A2, Rq, Rk, Rpk, Rvk, Mr 1, Mr 2, Vo
Örnekleme uzunluğu	Ic: 0,08mm, 0,25mm, 0,8mm, 2,5mm, 8mm fl: 0,08mm, 0,25mm, 0,8mm, 2,5mm, 8mm fh: 0,08mm, 0,25mm, 0,8mm, 2,5mm, 8mm
Büyütme özelliği	Dikey: 10-100.000 Yatay: 1-1.000
Yazıcı	Termal yazıcı
Ölçüm hızları	0,05mm/s, 0,1mm/s, 0,5mm/s, 1mm/s
Ağırlık	1,2kg
Ölçüm verileri	Hafıza kartı ile 50 ölçüme kadar kayıt özelliği - Yazılım programı ile verileri bilgisayara aktarabilme ve eğri form yüzeylerinde ölçüm yapabilme özelliği
Ekstra özellikler	- Ölçme esnasında probun uyguladığı kuvveti görebilme - Dokunmatik ekran

belirlenmiştir.

2.2. Taguchi Deney Tasarımı (Taguchi Experimental Design)

Deneyisel çalışmalarda doğru sonuca ulaşabilmek için doğru deney tasarımının yapılması gerekmektedir. Yapılan çalışmada, deney tasarım ve analiz yöntemi olarak Taguchi metodu kullanılmıştır. Dr. Genichi Taguchi tarafından geliştirilen bu yaklaşımda, sonuçları

kontrol çeliğinin sert tornalanmasında kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 3’de verilmiştir. Deney sonuçlarına %95 güven aralığında Varyans Analizi (ANOVA) uygulanarak Ra üzerinde değişkenlerin etki seviyeleri belirlenmiştir. Taguchi metoduna göre yapılan deney tasarımı ve istatistiksel analizler Minitab 15 yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3. Kontrol faktörleri ve seviyeleri (Control factors and levels)

Sembol	Kontrol faktörleri	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
A	Kesme hızı - V (m/dak)	50	100	150
B	İlerleme hızı - f (mm/dev)	0,08	0,16	0,24
C	Kesme derinliği - a (mm)	0,25	0,50	0,75

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

3.1. Yüzey Pürüzlülüğünün Optimizasyonu (Optimization of Surface Roughness)

AISI D2 soğuk iş takım çeliği üzerinde, Taguchi L₉ deney tasarımına göre gerçekleştirilen sert tornalama deneyleri sonucunda elde edilen Ra değerleri ile hesaplanan S/N oranları, Tablo 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Deney tasarımı, Ra ve S/N oranları (Experimental design, Ra and S/N ratios)

Deney numarası	(A)	(B)	(C)	Yüzey Pürüzlülüğü Ra (µm)	Ra - S/N oranı (dB)
	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme hızı (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)		
1	1	1	1	0,424	7,452
2	1	2	2	2,433	-7,722
3	1	3	3	3,410	-10,655
4	2	1	2	0,320	9,897
5	2	2	3	1,442	-3,179
6	2	3	1	2,040	-6,192
7	3	1	3	0,462	6,707
8	3	2	1	1,040	-0,340
9	3	3	2	2,353	-7,432

Kontrol faktörlerinin optimum seviyeleri ve performans karakteristiği (yüzey pürüzlülüğü) üzerinde bu faktörler arasından en etkili olanının belirlenmesinde Taguchi metoduyla oluşturulan S/N yanıt tablosu kullanılmaktadır. Bu tabloda en büyük S/N değerleri, o kontrol faktörüne ait optimum seviyeyi göstermektedir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde her bir kontrol faktörünün etkisini gösteren S/N yanıt tablosu Tablo 5'te verilmiştir.

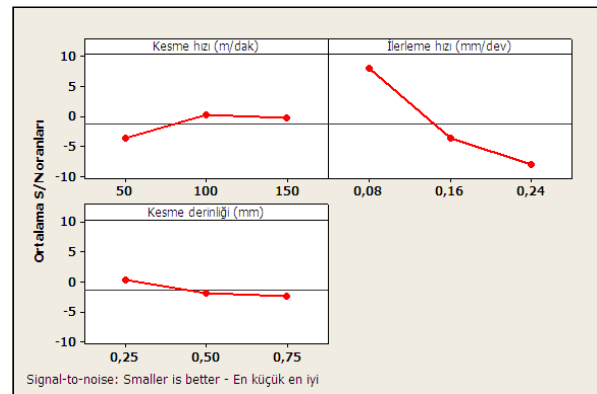
Çizelge 5. S/N yanıt tablosu (S/N response tables)

Seviyeler	Kontrol faktörleri		
	A	B	C
Seviye 1	-3,641	8,018	0,306
Seviye 2	0,175	-3,747	-1,752
Seviye 3	-0,355	-8,093	-2,375
Delta	3,816	16,112	2,682

Sıralama	2	1	3
----------	---	---	---

Tablo 5 incelendiğinde, yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili faktörlerin sırasıyla ilerleme hızı, kesme derinliği ve kesme hızı olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yapılan varyans analizi ile doğrulanmıştır. Bununla birlikte AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin sert tornalanmasında optimum yüzey pürüzlülüğü; kesme hızının üçüncü seviyesinde (A2), ilerleme hızının birinci seviyesinde

(B1) ve kesme derinliğinin birinci seviyesinde (C1) elde edilmiştir.

**Şekil 1.** S/N oranları için ana etki grafiği (Main effects plot for S/N ratios)

Kontrol faktörlerinin yani kesme parametrelerinin optimum değerlerini gösteren ana etki grafiği Şekil 1’de verilmiştir. S/N yanıt tablosunda olduğu gibi ana etki grafiğinde de en büyük S/N değerleri, o parametreye ait optimum seviyeyi göstermektedir. Buna göre kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği için sırasıyla optimum değerler 100 m/dak, 0,08 mm/dev ve 0,25 mm olarak belirlenmiştir.

3.2. Varyans Analizi (ANOVA) (Analysis of Variance)

Deney tasarımında kullanılan tüm kontrol faktörlerinin birbiriyle olan etkileşimleri, performans karakteristiği üzerinde nasıl bir etki meydana getirdiği ve parametrelerin farklı seviyelerinin performans karakteristiğinde ne gibi değişimlere sebep olduğunun belirlenebilmesi için varyans analizi yapılmaktadır [21]. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde, kontrol faktörlerinin etki seviyelerini belirlemek amacıyla yapılan varyans analizi sonuçları Tablo 6’da verilmiştir. Burada, her bir değişkenin önem seviyesini gösteren F değerleri ve yüzde etki oranları (Percentage Contribution Ratio-PCR) görülmektedir. Bu analiz %95 güvenirlilik ve %5 önem seviyeleriyle gerçekleştirilmiştir. Kontrol faktörlerinin etkisi F değerlerinin karşılaştırılmasıyla belirlenir. F değeri en büyük olan faktör, sonuca en fazla etki eden faktördür.

ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametrenin %77,88’lik oranla

Taguchi optimizasyon metodunu kullanarak, yapılan deneysel çalışma da yüzey pürüzlülüğü değerlerinin optimal sonuçları elde edilmiş ve ANOVA analizleri yapılarak sonuç üzerinde etkisi olan parametrelerin yüzde dağılımları belirlenmiştir. Optimizasyon işleminin son adımı, doğrulama deneylerinin yapılması ve optimizasyon işleminin geçerliliğinin test edilmesidir. Taguchi optimizasyonu sonucunda optimal yüzey pürüzlülüğü değerini veren parametre grubu bazen mevcut deneylerden herhangi biri olabilirken, bazen ise yapılan deneylerin haricinde bir deney olabilmektedir. Yapılan çalışmada yüzey pürüzlülüğü için optimum sonuca mevcut deneylerden farklı olarak A2B1C1 deney şartlarında ulaşılmıştır. Bu yüzden doğrulama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Taguchi tarafından belirlenen optimum kesme şartlarındaki yüzey pürüzlülüğü değerinin hesaplanmasında Eşitlik 2 ve Eşitlik 3 kullanılmıştır [23]. Bu eşitlikler kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda, optimum şartlar için yüzey pürüzlülüğü değeri 0,280 µm olarak bulunmuştur.

$$\eta_G = \bar{\eta}_G + (\bar{A}_2 - \bar{\eta}_G) + (\bar{B}_1 - \bar{\eta}_G) + (\bar{C}_1 - \bar{\eta}_G) \quad (2)$$

$$Ra_{cal} = 10^{-\eta_G / 20} \quad (3)$$

Doğrulama deneylerinden elde edilen sonuçlar, yapılan optimizasyonun başarısını yansıtmaktadır. Hesaplanan optimum tahmini yüzey pürüzlülüğü değerleri ve doğrulama deneyleri sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Çizelge 6. ANOVA tablosu (ANOVA table)

Kontrol faktörü	Serbestlik derecesi (DF)	Kareler toplamı (SS)	Kareler ortalaması (MS)	F	P	PCR (%)
A	2	1,3219	0,6609	14,10	0,066	14,12
B	2	7,2908	3,6454	77,79	0,013	77,88
C	2	0,6450	0,3270	6,98	0,125	6,89
Hata	2	0,0937	0,0469			1,00
Toplam	8	9,3604				100

ilerleme hızı (Faktör B) olduğu görülmüştür. Kesme hızı ise %14,12’lük oranla ilerleme hızından sonra en etkili olan parametredir. Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en az etkiye sahip parametrenin %6,89’luk oranla kesme

Doğrulama deneyi sonucunda optimum şartlar için yüzey pürüzlülüğü değeri 0,245 µm olarak ölçülmüştür. Tablo 7’deki pürüzlülük değerleri karşılaştırıldığında, doğrulama deneyi sonuçları ile Taguchi yaklaşımından

Çizelge 7. Hesaplanan ve doğrulama deneyi sonuçlarının karşılaştırılması (Comparison of confirmation tests results to calculated values)

Hesaplanan değerler		Doğrulama deneyi sonuçları		Farklar	
Ra _{cal} (µm)	S/N _{cal} (dB)	Ra (µm)	S/N (dB)	Ra (µm)	S/N (dB)
0,280	11,048	0,245	12,216	0,011	1,168

derinliği olduğu görülmüştür. Yapılan varyans analizi ile Tablo 5’teki S/N yanıt tablosu ve Şekil 1’deki ana etki grafiği sonuçları doğrulanmıştır.

3.3. Doğrulama Deneyleri (Confirmation Tests)

elde edilen sonuçlar arasındaki farkın göz ardı edilebilecek bir seviyede olduğu dikkati çekmektedir. Bu sonuçlara dayanarak, Taguchi optimizasyonunun 0,05 anlamlılık düzeyinde başarıyla uygulandığını söylemek mümkündür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, geleneksel ısıtma işlem görmüş AISI D2 (60-62 HRC) soğuk iş takım çeliğinin farklı kesme parametrelerinde kaplamasız seramik takım ile işlenmesi için bir dizi sert tornalama deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneyler Taguchi L₉ ortogonal dizinine göre tasarlanarak 27 deney yerine 9 deney ile optimal yüzey pürüzlülüğü değerlerine daha kısa sürede ulaşılmış, bu sayede zaman ve maliyetten kazanımlar elde edilmiştir. Bununla birlikte varyans analizi ile kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Yapılan doğrulama deneyleri ile optimizasyonun geçerliliği test edilmiştir. Bu bağlamda elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür.

- Taguchi analizi sonucu, ortalama S/N oranlarının en yüksek değerlerinin alınmasıyla elde edilen optimum değerler incelendiğinde; kesme hızının ikinci seviyesi olan 100 m/dak, ilerleme hızının birinci seviyesi olan 0,08 mm/dev ve kesme derinliğinin birinci seviyesi olan 0,25 mm değerlerinde yüzey pürüzlülüğünün en iyi sonucu verdiği görülmüştür.
- ANOVA sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü üzerindeki en etkili parametrenin ilerleme hızı (%77,88), daha sonra sırasıyla kesme hızı (%14,12) ve kesme derinliği (%6,89) olduğu görülmüştür.
- Optimum kesme şartlarındaki yüzey pürüzlülüğü sırasıyla hesaplamalar ve doğrulama deneyleri sonucu 0,280 µm ve 0,245 µm olarak bulunmuştur.
- Doğrulama deneyleri sonucunda Taguchi optimizasyonunun başarıyla uygulandığı görülmüştür.

Bu sonuçlara göre, AISI D2 çeliğinin sert tornalama işlemindeki optimum yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde, Taguchi deneysel tasarım metodunun başarılı bir şekilde uygulanabileceği görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar, bu çalışmayı 2015.07.04.388 nolu BAP projesiyle destekleyen Düzce Üniversitesi'ne teşekkürlerini sunar. Bu makale, Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumunda (UMAS 2015) sunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Çiçek A., Ekici E., Uygur İ., Akıncıoğlu S. ve Kıvık T., "AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin delinmesinde derin kriyojenik işlemin takım ömrü üzerindeki etkilerinin araştırılması", *SDU International Journal of Technologic Sciences*, 4(1): 1-9, (2012).
2. Şirin E., Turgut Y. ve Korkut İ., "Farklı sertlikteki AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezeleme işleminde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına etkisi", *Politeknik Dergisi*, 15(1): 9-14, (2012).
3. Töenshoff H. K., Arendt C. and Ben Amor R., "Cutting of Hardened Steel", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 49(2): 547-566, (2000).
4. Lima J. G., Avila R. F., Abrao A. M., Faustino M. and Davim J.P., "Hard turning: AISI 4340 high strength low alloy steel and AISI D2 cold work tool steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 169: 388-395, (2005).
5. Agrawal A., Goel S., Rashid W. B. and Price M., "Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel (69 HRC)", *Applied Soft Computing*, 30: 279-286, (2015).
6. Dosbaeva G. K., El Hakim M. A., Shalaby M. A., Krzanowski J. E. and Veldhuis S. C., "Cutting temperature effect on PCBN and CVD coated carbide tools in hard turning of D2 tool steel", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 50: 1-8, (2015).
7. Özel T., Karpat Y., Figueira L., and Paulo Davim J., "Modelling of surface finish and tool flank wear in turning of AISI D2 steel with ceramic wiper inserts", *Journal of Materials Processing Technology*, 189: 192-198, (2007).
8. Göloğlu C. and Arslan Y., "Zig zag machining surface roughness modelling using evolutionary approach", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 20: 203-210, (2009).
9. Çiçek A., Kıvık T. and Ekici E., "Optimization of drilling parameters using Taguchi technique and response surface methodology (RSM) in drilling of AISI 304 steel with cryogenically treated HSS drills", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 26: 295-305, (2015).
10. Taguchi G., Chowdhury S. and Wu Y., "Taguchi's Quality Engineering Handbook", *John Wiley&Sons Inc.*, New Jersey, USA, (2005).
11. Palanikumar K., "Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites", *Measurement*, 44: 2138-2148, (2011).
12. Yücel E. ve Günay, M., "Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerin (Ni-Hard) tornalanmasında kesme kuvvetinin modellenmesi", *3. Ulusal Talah İşletim Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 489-495, (2012).
13. Kasman Ş., "Lazerle derin oyma tekniğinde EN 7075 alüminyum alaşımı için işlem parametrelerinin etkilerinin Taguchi methodu kullanılarak incelenmesi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(2): 41-54, (2011).

14. Pınar A. M., Fırat K., Pınar A. F. ve Filiz S., “Kanal torna kaleminin yüzey pürüzlülük performansının optimizasyonu”, **3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu**, Ankara, Türkiye, 240-250, (2012).
15. Günay M. and Yücel E., “Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron”, *Measurement*, 46: 913-919, (2013).
16. Pınar A. M., Filiz S. and Ünlü B. K., “A comparison of cooling methods in the pocket milling of AA5083-H36 alloy via Taguchi method”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi:10.1007/s00170-015-7666-1.
17. Yücel E. and Günay M., “Modelling and optimization of the cutting conditions in hard turning of high-alloy white cast iron (Ni-Hard)”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 227(10): 2280-2290, (2013).
18. Şirin E., Şirin Ş., Turgut Y. ve Korkut İ., “AISI D2 soğuk iş takım çeliğinin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünün Taguchi metodu ile optimizasyonu”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3: 132-144, (2015).
19. Sahoo, A. K., “Application of Taguchi and regression analysis on surface roughness in machining hardened AISI D2 steel”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 5: 295–304, (2014).
20. Sharma, P., Singh Sidhu, B. and Sharma, J., “Investigation of effects of nanofluids on turning of AISI D2 steel using minimum quantity lubrication”, *Journal of Cleaner Production*, 108: 72–79, (2015).
21. Turgut E. and Dikici A., “Optimization of design parameters of Co-axial heat exchanger with Taguchi method”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)*, Elazığ, Turkey, 278-281, (2011).
22. Masmiaati N. and Sarhan Ahmed A. D., “Optimizing cutting parameters in inclined end milling for minimum surface residual stress – Taguchi approach”, *Measurement*, 60: 267–275, (2015).
23. Yücel E. and Saruhan H., “Design optimization of rotor-bearing system considering critical speed using Taguchi method”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, doi:10.1177/095440891557858.

Ön Karışimsız ve Ön Karışımli Metan Alevlerinin Baca Yanma Parametrelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Mustafa İLBAŞ*, Serhat KARYEYEN*, Kazım ÇİLİNGİR**

* Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

** Miçsan İnş. İml. Mon. San. ve Tic. Ltd. Şti.

(Geliş / Received : 14.01.2016 ; Kabul / Accepted : 15.02.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, ön-karışimsız ve ön-karışımli metan alevlerinin yanma ürünleri sıcaklık ve emisyon değerleri, farklı ısı güçleri ve farklı hava fazlalıkları için deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma, 5 kW, 10 kW, 15 kW ve 20 kW'lık ısı güçlerinde ve $\lambda=1,2$, $\lambda=1,5$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık katsayıları için gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneysel çalışmada elde edilen sonuçlara göre, ön-karışımli metan alevinin yanma ürünleri sıcaklık ve CO emisyonları bakımından daha iyi durumda olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ısı güç arttırıldıkça, yanma ürünlerinin sıcaklık ve NO_x emisyonlarının arttığı, buna karşın, hava fazlalık katsayısı artması neticesinde, yanma ürünlerinin sıcaklıkları ve NO_x değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Metan, Emisyon, Yanma, Baca Gazı

Experimental Investigation of Flue Gas Combustion Parameters of Non-Premixed and Premixed Methane Flames

ABSTRACT

Flue gas temperature and emission values of non-premixed and premixed methane flames has been experimentally investigated under different thermal powers and excess air ratios in the present study. This study has been conducted for thermal powers of 5 kW, 10 kW, 15 kW and 20 kW and excess air ratios of $\lambda=1,2$, $\lambda=1,5$ and $\lambda=1,7$. The results show that the premixed methane flame is better than non-premixed methane flame in terms of flue gas temperature and CO emissions. It is concluded that flue gas temperatures and NO_x emissions increase as thermal powers are increased. It is also exhibited that flue gas temperatures and NO_x values decrease as excess air ratios are increased.

Keywords: Methane, Emission, Combustion, Flue Gas

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünya'da enerjiye olan ihtiyaç hızla artmaktadır. Günümüzde bu ihtiyacın % 80'inden fazlası hala fosil yakıtlardan karşılanmaktadır. Fosil yakıtlar, mineral yakıtlar olarak da bilinir. Hidrokarbon ve yüksek oranlarda karbon içeren kömür, petrol ve doğal gaz gibi doğal enerji kaynaklarıdır ve bu kaynaklar, ölen canlı organizmaların oksijensiz ortamda milyonlarca yıl boyunca, çözülmesi ile oluşmaktadır. Bu kaynaklar içerisinde doğalgaz ayrı bir yerde bulunmaktadır. Doğalgaz, gaz yakıt olarak bir çok uygulamada rahatlıkla kullanılabilir ve zararlı emisyon oranı en düşük fosil yakıt olarak tarif edilmektedir. Çıkarıldığı yere göre değişmekle birlikte, içerisinde çok yüksek oranda metan gazı bulundurmaktadır. Bu açıdan değerlendirilecek olursa, doğalgazın yanma sonu emisyonlarını incelemek için metan yakıtını

kullanmakta hiç bir sakınca bulunmamaktadır.

Doğalgazın evsel ve endüstriyel uygulamalarda çok geniş bir kullanım alanı bulmaktadır. Özellikle, elektrik üretimi, ısıtma sistemleri vb., doğalgazın yakılması neticesinde açığa çıkan enerji genellikle bir iş akışkanına verilmekte ve bu akışkan sayesinde güç üretimi veya ısıtma gerçekleştirilmektedir. Doğalgazın veya metanın yakılması neticesinde, gerek yanma odası bünyesinde gerekse baca gazı analizleri anlamında literatürde bulunan bazı çalışmalar değerlendirilecek olursa; Fackler vd. [1] tarafından yapılan çalışmada, zayıf ön-karışımli CH₄, CO₂ ve N₂ karışım yakıtın yanma sonu NO_x oluşum seviyeleri deneysel ve sayısal olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada, CH₄, farklı seviyelerde CO₂ ve N₂ ile seyreltilmiştir. Deneysel sonuçlar değerlendirildiğinde, yakıt seyreltiminin NO_x emisyonlarını azaltabildiği belirlenmiştir. Littlejohn vd. [2] düşük girdap enjektörlü bir gaz türbininde, farklı yakıt tiplerinin ön karışımli türbülanslı alevleri üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla deneysel

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: ilbas@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 357-365

çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yılmaz [3] tarafından yapılan bir çalışmada, girdap sayısının doğalgaz difüzyon alevi üzerindeki etkileri sayısal olarak araştırılmıştır. Yapılan modelleme sonuçları değerlendirildiğinde, girdap sayısının alev sıcaklığını, CO₂, H₂O ve O₂ gibi yanma sonu emisyonlarını ciddi derecede etkilediği ve yanma odası boyunca meydana gelen dağılımların oldukça farklı olduğu belirlenmiştir. Feyz vd. [4] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, brülör bünyesinde bulunan türbülötörün, brülörün ucuna olan uzaklığının yanma karakteristiğine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, türbülötör uzaklığının yanma performansını oldukça fazla etkilediği gözlemlenmektedir. Türbülötörün yanma odası girişine olan uzaklığı arttırıldıkça, metan alevinin yanma odası içerisindeki etkisinin azaldığı belirlenmiş olup, bu durumda, yanmanın, brülör içerisinde daha fazla gerçekleştiği ortaya konulmuştur. Khalid Saqr vd. [5] tarafından yapılan bir çalışmada serbest akım türbülansının NO_x ve is oluşumuna olan etkileri metan alevi için sayısal olarak modellenmiştir. Elde edilen sayısal sonuçlara göre, havanın serbest akım türbülans sıklığının artmasının alevdeki NO seviyelerinde büyük bir düşüşe sebep olduğu ortaya konulmuştur. Yegian ve Cheng [6] tarafından yürütülen bir çalışmada, düşük NO_x uygulamaları için zayıf ön karışimli düşük-girdaplı bir yakıcı geliştirilmiştir. Wang vd. [7] tarafından yürütülen bir çalışmada ise türbülanslı yanmanın NO oluşum seviyelerine olan etkileri araştırılmıştır.

Yukarıda belirtilen çalışmalar değerlendirildiğinde ve yanma sonu emisyonlarına ilişkin kısıtlamalar göz önünde bulundurulduğunda, yanma işlemleri neticesinde ortaya çıkan yanma sonu emisyonlarının ve yanma ürün sıcaklıklarının ne durumda olduğunun bilinmesi oldukça önemlidir. Bu çalışmada, deneysel bir sistem kullanılarak metan gazının yanma sonu yanma ürünlerinin sıcaklık ve emisyon parametreleri, farklı ısı güç ve farklı hava fazlalık katsayıları için araştırılmıştır.

2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

Bu çalışmada, farklı yanma şartları için ön-karışimli ve ön-karışimsız metan alevlerinin yanma ürünlerinin sıcaklık ve emisyon değerleri elde edilmiş ve karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bu deneysel çalışma, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde bir proje kapsamında geliştirilmiş olarak bulunan ön-karışimli ve ön-karışimsız metan brülörleri kullanılarak, 1 m uzunluğunda ve 40 cm çapında bir yanma odasının aynı projeye ait sisteminin bacasından alınan deneysel sonuçlar kullanılarak ortaya konulmuştur [8]. Şekil 1 ve Şekil 2'de ilgili deney düzeneğinin genel bir görünümü ve kullanılan yanma odası ve baca sistemi gösterilmiştir. Şekil 1'de gösterilen yanma sisteminin sol tarafında, yüksek basınçta depolanmış metan tüpü ve sağ tarafında da kompresör bulunmaktadır. Bu tüpten ve

kompresörden elde edilen metan gazı ve hava, yakıt ve hava hatlarındaki regülötörler yardımıyla istenilen basınca (21 mbar) kadar getirilmektedir. Ayrıca, bu hatlar üzerinde bulunan debimetreler yardımıyla, istenilen yakıt ve hava debisi ayarlanmaktadır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin genel bir görünüşü (A general view of the experimental rig)



Şekil 2. Yanma odası (Combustion chamber)

Şekil 2'de ise, ön-karışimsız ve ön-karışimli metan alevlerinin elde edildiği yanma odası gösterilmiştir. Yanma odasının üst kısmında (daralan bölgesinde) bulunan ölçüm probu yardımıyla, bu çalışma kapsamında ölçülen sıcaklık ve emisyon değerleri elde edilmiştir. Bu ölçüm işlemlerinde, aynı proje kapsamında temin edilen MRU Tipi Baca Gazı Analizörü kullanılmıştır.



Şekil 3a.Ön-karışimsız (sol) ve ön-karışimli (sağ) metan brülörleri (Non-premixed (left) and premixed (right) methane burners)

Şekil 3a ve Şekil 3b’de, bu çalışmada kullanılan ön-karışimli ve ön-karışimsız metan brülörleri gösterilmiştir. Bu brülörler, 20 kW’lık ısı güce kadar metan yakıtını yakabilecek şekilde tasarlanmış ve imal edilmiştir. Ön-karışimsız metan brülöründe iki tip hava çıkışı bulunmaktadır. İlk hava çıkışı (yakıt çıkışına yakın olan) dairesel olup 8 adettir ve herhangi bir türbülötör açısı bulundurmamaktadır. İkinci hava çıkışı ise (türbülötör gövdesine yakın olan), eğrisel bir çıkış olup, hava-yakıt karışımını daha iyi sağlamak için 15°’lik türbülötör açısı ile tasarlanmıştır. Bahsi geçen bu eğrisel çıkıştan 10 adet bulunmaktadır. Brülörlerin yakıt hattı ise, hava hattı ile eş merkezli olup brülörün ortasından yanma bölgesine doğru yönlendirilmekte ve yanma bölgesine girmeden önce, yakıtın yönü, aksel yönden radyal yöne doğru hareket ettirilerek daha iyi yakıt/hava karışımı ve alev kararlılığı sağlanmaktadır. Ön-karışimli metan brülöründe ise, yakıt ve hava, yanma bölgesine gelmeden önce, hat üzerinde bulunan bir karıştırıcıda karıştırılmakta ve brülörün Şekil 3a ve

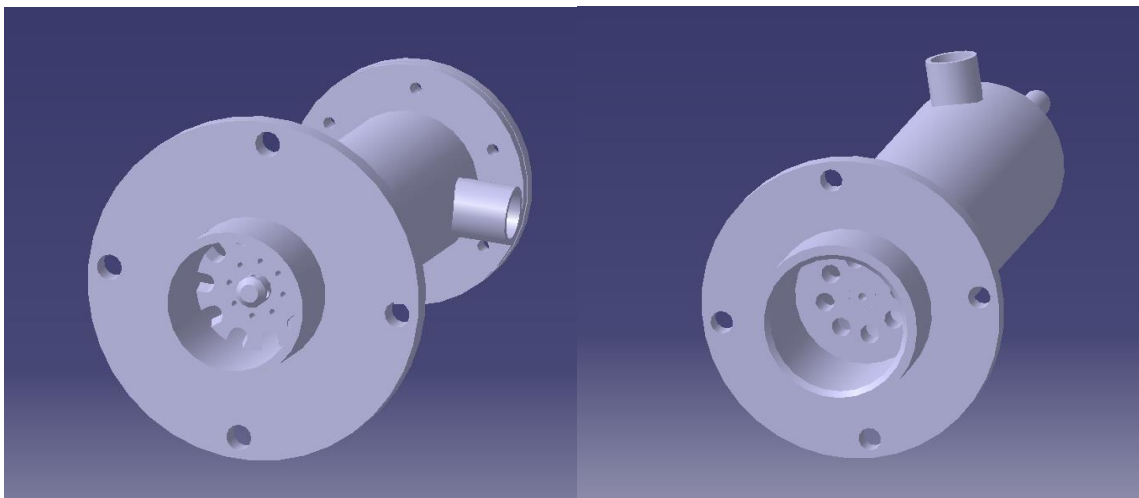
Şekil 3b’de gösterilen büyük delikli nozullardan geçerek yanma bölgesine ulaşmaktadır. Bahsi geçen deliklerden 8 adet bulunmaktadır.

Çalışmada kullanılan metan alevleri için yanma şartları; 5 kW, 10 kW, 15 kW ve 20 kW ısı güçleri için 1,2, 1,5 ve 1,7 hava fazlalıklarında, ön-karışimli ve ön-karışimsız olarak gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen ısı güçleri belirlemek için aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$\text{Isıl Güç} = \text{LHV} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{Nm}^3} \right) \times Q \left(\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \right) \times \frac{1(\text{h})}{3600(\text{s})} \quad (1)$$

Bu eşitlikte gösterilen LHV değeri, metanın alt ısı değeri, Q değeri de, çalışılan ısı gücü için yanma odasına beslenmesi gereken yakıt miktarını göstermektedir.

Yakıt ve hava debilerini, yanma ürünlerinin sıcaklık ve emisyon değerlerini belirleyebilmek için kullanılan debimetreler ve baca gazı analizörünün özellikleri Çizelge 1’de gösterilmiştir



Şekil 3b. Ön-karışimsız (sol) ve ön-karışimli (sağ) metan brülörlerinin 3D modelleri (3D modelling of non-premixed (left) and premixed (right) methane burners)

Çizelge 1. Debimetre ve baca gazı analizörünü özellikleri (Properties of flowmeter and flue gas analyzer)

Debimetre	Baca Gazı Analizörü
Şamandıralı Cam Tüplü Paslanmaz Çelik Debimetre, Hassasiyet % 1	MRU Tipi Baca Gazı Analizörü, O ₂ (%) 0-21, Hassasiyet: ±0,2 (%) CO (ppm) 0-10000 ppm, Hassasiyet: ±10 ppm NO ve NO ₂ (ppm), 0-1000 ve 0-200 ppm, Hassasiyet: ±5 ppm SO ₂ (ppm) 0-2000 ppm, Hassasiyet: ±10 ppm CO ₂ (%) 0-40, Hassasiyet: ±0,3 (%) Yanma Ürünlerinin Sıcaklığı (°C) 0-1100°C, Hassasiyet: ±2°C

3. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Bu çalışmada, ön-karışimsız ve ön-karışimli metan alevlerinin yanma ürünlerinin sıcaklık ve emisyon değerleri, farklı ısı güçleri ve farklı hava fazlalıkları için deneysel olarak araştırılmıştır. Çalışma, 5 kW, 10 kW, 15 kW ve 20 kW'lık ısı güçlerinde ve $\lambda=1,2$, $\lambda=1,5$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık katsayıları için gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Çalışmada herhangi bir geri tepme veya alev kopması yaşanmamış olup, metan alevleri, ön-karışimsız ve ön-karışimli olarak sorunsuz bir şekilde yakılmıştır.

Çizelge 2, 10 kW ısı güç ve $\lambda=1,2$ hava fazlalığı için ön-karışimli ve ön-karışimsız metan alevlerinin yanma ürünlerinin sıcaklık ve emisyon değerlerini göstermektedir. Burada seçilen 10 kW ve $\lambda=1,2$ yanma şartları, Çizelge 2'de gösterilen ön-karışimli ve ön-karışimsız metan alevlerinin alev tipi olarak etkilerini gözlemlemek için her iki durumda da aynı olması hedeflenerek gelişigüzel seçilmiştir. Çizelge 2'de görüldüğü gibi, ön-karışimli metan alevinin yanma ürünlerinin sıcaklığı 565,3°C olarak ölçülmüş olup, ön-karışimsız metan alevinin yanma ürünlerinin sıcaklığından (560,6°C) daha yüksektir. Ön-karışimli yanmada, yakıt ve hava, yanma odasına girmeden önce karıştıkları için, daha iyi bir yanma gerçekleşmektedir. Bu durum, baca gazı emisyonlarından da anlaşılmaktadır. Çizelge 2'de görüldüğü gibi, ön-karışimsız metan alevi için elde edilen CO₂ değeri % 7,0 iken ön-karışimli metan alevi için bu değer % 7,7 olarak belirlenmiştir. CO emisyonları da değerlendirilecek olursa, ön-karışimli metan alevi için yanmanın daha iyi olduğu (daha fazla C atomunun CO₂'ye dönüştüğü) ölçülen 30 ppm değeri ile anlaşılmaktadır. Aynı emisyon değeri, ön-karışimsız metan alevi için 270 ppm olarak belirlenmiştir.

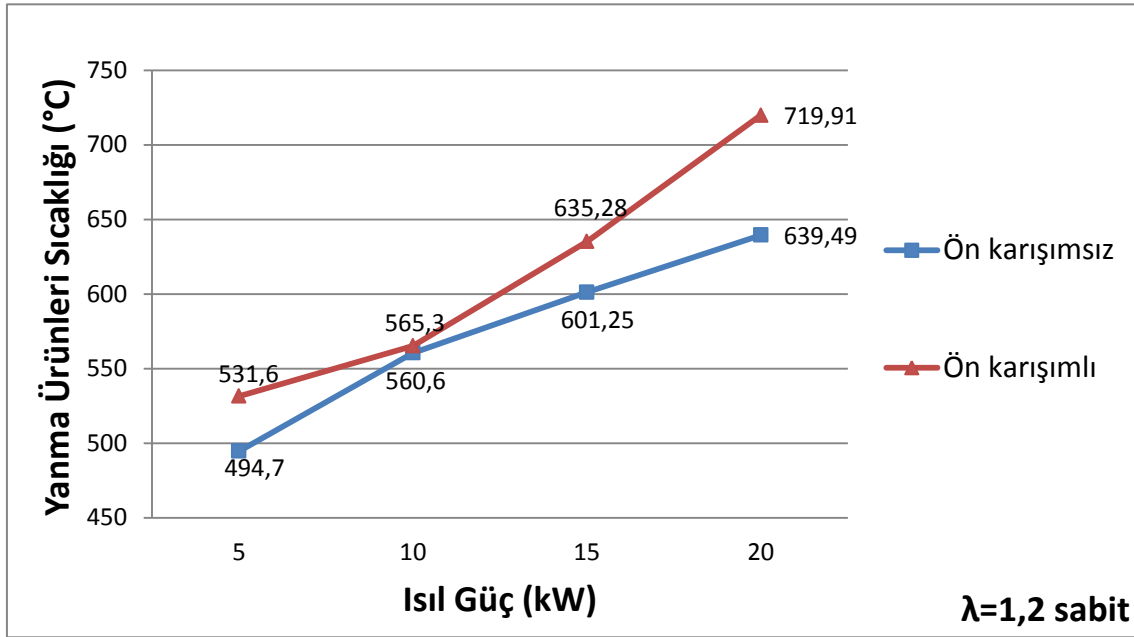
Çizelge 2: Ölçülen yanma ürünlerinin sıcaklık ve emisyon değerleri (Measured flue gas temperature and emission values)

	Ön-karışimsız	Ön-karışimli
Sıcaklık (°C)	560,6	565,3
CO₂ (%)	7,0	7,7
CO (ppm)	270	30
NO_x (ppm)	29	45

NO_x emisyonlarını doğru değerlendirebilmek için, öncelikle NO_x oluşum mekanizmalarını ortaya koymak gerekmektedir. Bilinen 3 tip NO_x oluşum mekanizması bulunmaktadır. Bunlar, yakıt (fuel) NO_x, ısı (thermal) NO_x ve ani (prompt) NO_x oluşum mekanizmalarıdır. Yakıt NO_x, yakıtta bağlı bulunan azot atomlarından kaynaklanmaktadır (HCN, NH₃ gibi). Isıl NO_x, yakma havasında serbest halde bulunan azotun yüksek sıcaklıklardaki oksidasyonu neticesinde ortaya çıkmaktadır. Ani NO_x ise, alev bölgesinde bulunan yakıtta ait çok küçük parçacıklarla serbest azotun reaksiyonu neticesinde ortaya çıkmaktadır [9]. Bu çalışmada kullanılan metan yakıtı, bağlı azot içermediğinden, oluşan NO_x seviyelerinde yakıt NO_x katkısı bulunmamaktadır. Ayrıca, sıcaklık yükseldikçe, NO_x oluşumlarında baskın mekanizmanın da ısı NO_x olduğu bilinmektedir. Bu tanımlardan hareketle, yüksek sıcaklık bölgelerinde daha yüksek NO_x miktarları beklenmekte olup, ön-karışimli metan alevi için ölçülen NO_x değeri 45 ppm olurken, ön-karışimsız metan alevi için bu değer 29 ppm olarak belirlenmiştir. Bahsi geçen tanımla bu sonuçlar da oldukça uyum içerisindedir.

3. 1. Isıl Gücün Etkisi (Effect of Thermal Power)

Ön-karışimsız ve ön-karışimli metan alevleri için, 5 kW, 10 kW, 15 kW ve 20 kW'lık farklı ısı güçlerinde $\lambda=1,2$ hava fazlalığı için yanma ürünlerinin sıcaklık değerlerinin değişim grafiği Şekil 4'te gösterilmiştir.

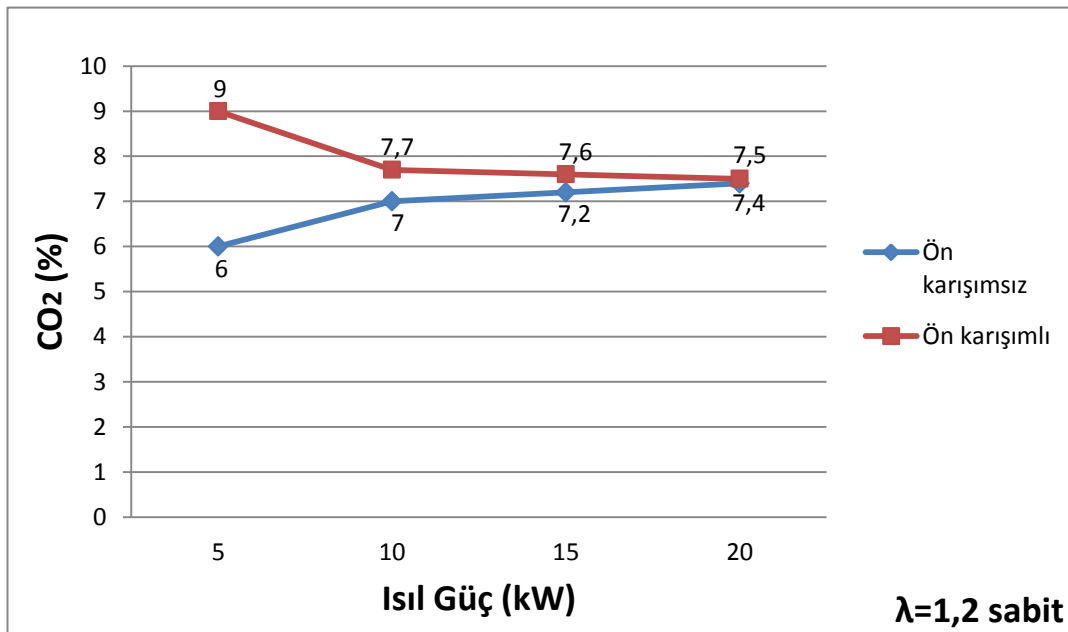


Şekil 4. Isıl gücün yanma ürünlerinin sıcaklıklarına etkisi (Effect of thermal power on flue gas temperatures)

Şekil 4'te görüldüğü üzere ön-karışimli yanma şartlarında hava ile yakıt, yanma bölgesine gelmeden önce karıştığı için yanmanın daha iyi gerçekleştiği ve yanma ürünlerinin sıcaklık değerlerinin daha yüksek olduğu, ancak aynı yanma şartlarında ön-karışimsız durum için ön- karışimli yanmaya göre nispeten daha düşük yanma ürünü sıcaklık değerlerine ulaşıldığı görülmektedir. Ayrıca, yanma şartlarından ısıl güç arttırıldıkça, yanma ürünlerinin sıcaklıklarının her iki alev tipi için de yükseldiği gözlemlenmiştir.

fazlalığı için baca gazı emisyon değerlerinin değişim grafikleri sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de (CO_2 , CO ve NO_x) gösterilmiştir.

Şekil 5'ten de anlaşılacağı gibi, ön-karışimli metan alevinde daha yüksek oranlarda CO_2 oluşumu gerçekleşmiştir. Ön-karışimli alev şartları için, karışımın daha iyi olması, metan bünyesinde bulunan C atomlarının daha iyi yanmasına ve daha fazla miktarda CO_2 oluşuma sebep olmuştur. Ayrıca, ısıl gücün artması



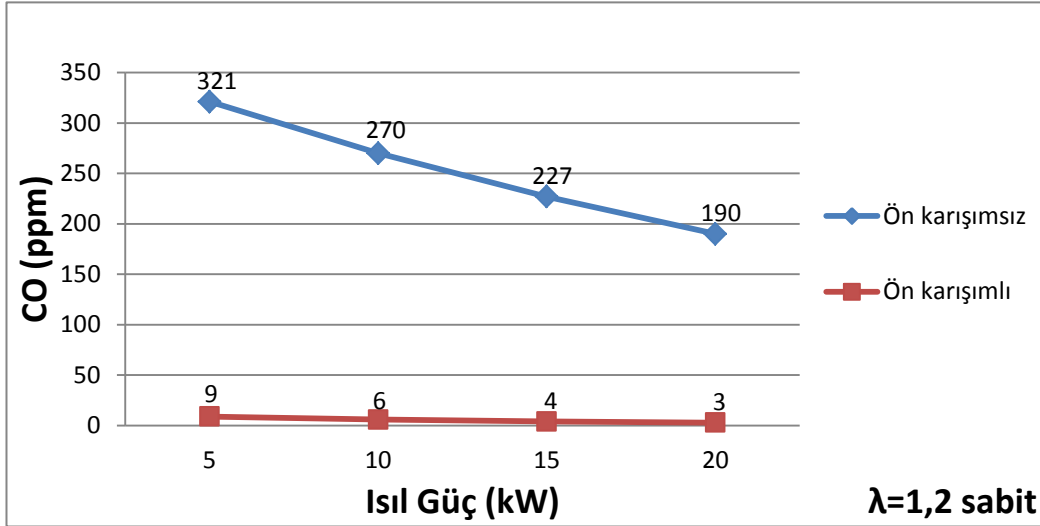
Şekil 5. Isıl gücün CO_2 emisyonlarına etkisi (Effect of thermal power on CO_2 emissions)

Ön-karışimsız ve ön-karışimli metan alevleri için, 5 kW, 10 kW, 15 kW ve 20 kW ısıl güçlerde $\lambda=1,2$ hava

ile birlikte, ön-karışimli metan alevi için CO_2 değerleri düşerken, ön-karışimsız alev şartlarında bu durumun

tam aksi yaşanmıştır. Bu sonuç, ön-karışimsız metan alevi için, ısı gücü arttırıldıkça (yani beslenen yakıt miktarı arttırıldıkça) yanmamış C atomlarının da yanabildiğini göstermekte ve anlık ve % olarak ölçülen CO₂ değerinde artışa neden olmaktadır. Bunun tam aksine, ön-karışimli metan alev şartları için, ısı gücü arttırıldıkça anlık ve % olarak ölçülen CO₂ değeri azalmaktadır. Yapılan anlık ölçüm esnasında, başka bir

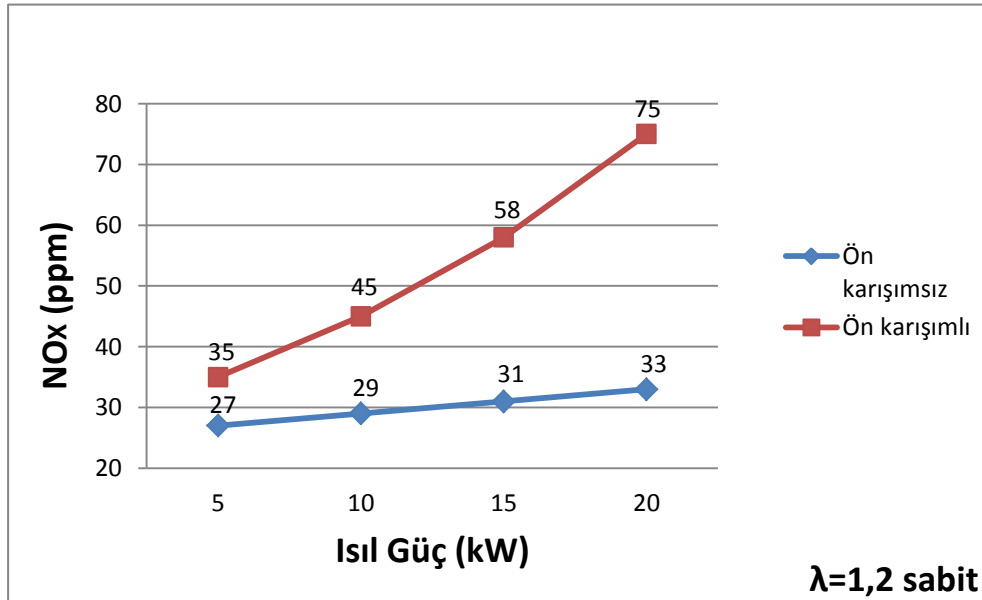
ortaya konulmuştur. Şekil 6'ya göre, ön-karışimsız metan alevi şartlarında yanma tam gerçekleşmemiş ve eksik yanma ürünü CO ortaya çıkmıştır. Ön-karışimli metan alevi için bu durum değerlendirilecek olursa, hemen hemen tam yanma sağlanmış olarak görülmektedir. Ayrıca, ısı gücü arttıktça, Şekil 5'te gösterilen CO₂ sonuçları ile uyumlu olarak CO emisyon değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Isıl gücün CO emisyonlarına etkisi (Effect of thermal power on CO emissions)

emisyonun hızla artması (örneğin, NO_x, Şekil 7 veya bu çalışmada sunulmayan bir başka emisyon) o anda ölçülen CO₂ emisyonlarında miktar olarak bir azalma

Şekil 7, ön-karışimli ve ön-karışimsız metan alevleri için bacadan ölçülen NO_x emisyonlarını göstermektedir. Bilindiği gibi, NO_x oluşumundaki en baskın mekanizma



Şekil 7. Isıl gücün NO_x emisyonlarına etkisi (Effect of thermal power on NO_x emissions)

olmasa da, tüm emisyonlar içerisinde % olarak belirtildiği için azalma şeklinde görülmektedir.

Şekil 6'da ise, farklı ısı güçleri için, ön-karışimsız ve ön-karışimli metan alevlerinin yanma sonu CO değerleri

ısı NO_x mekanizmasıdır ve NO_x oluşumları genellikle yüksek sıcaklık bölgelerinde daha fazla olmaktadır. Bu açıdan değerlendirildiğinde, Şekil 7'de gösterilen NO_x değerleri, Şekil 4'te gösterilen sıcaklık seviyelerine uygun olarak ön-karışimli metan alev şartları için daha

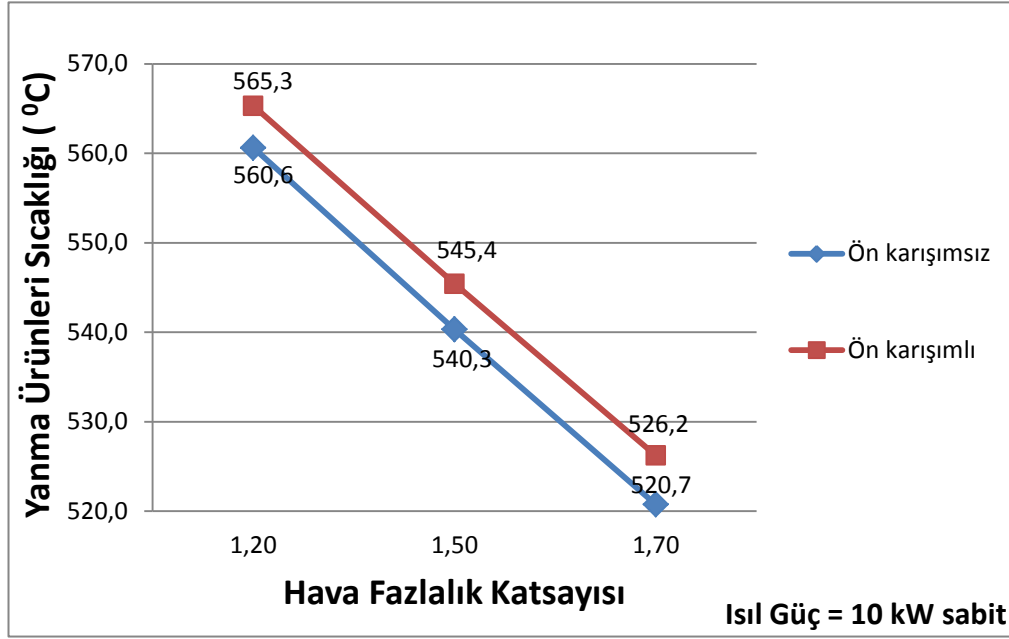
fazla oluşmuştur. Ayrıca, ısı güç arttıkça, NO_x oluşum miktarlarının her iki alev durumu için de arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, ısı güç arttırıldıkça sıcaklık seviyelerindeki yükselmedir.

3. 2. Hava Fazlalık Katsayısının Etkisi

Ön-karışimsız ve ön-karışimli metan alevleri için, 10 kW ısı güçte $\lambda=1,2$, $\lambda=1,5$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık

azaldığı görülmektedir. Bunun ana nedeni, yanma için gereken miktardan daha fazla gönderilen havanın, yanma sonu ürünlerinin sıcaklığı düşürmesi ve bir önceki hava fazlalık katsayısı durumu için ortaya çıkan yanma ürünlerinin sıcaklıklarından daha düşük seviyelerde yanma ürünü sıcaklıklarına neden olmasıdır.

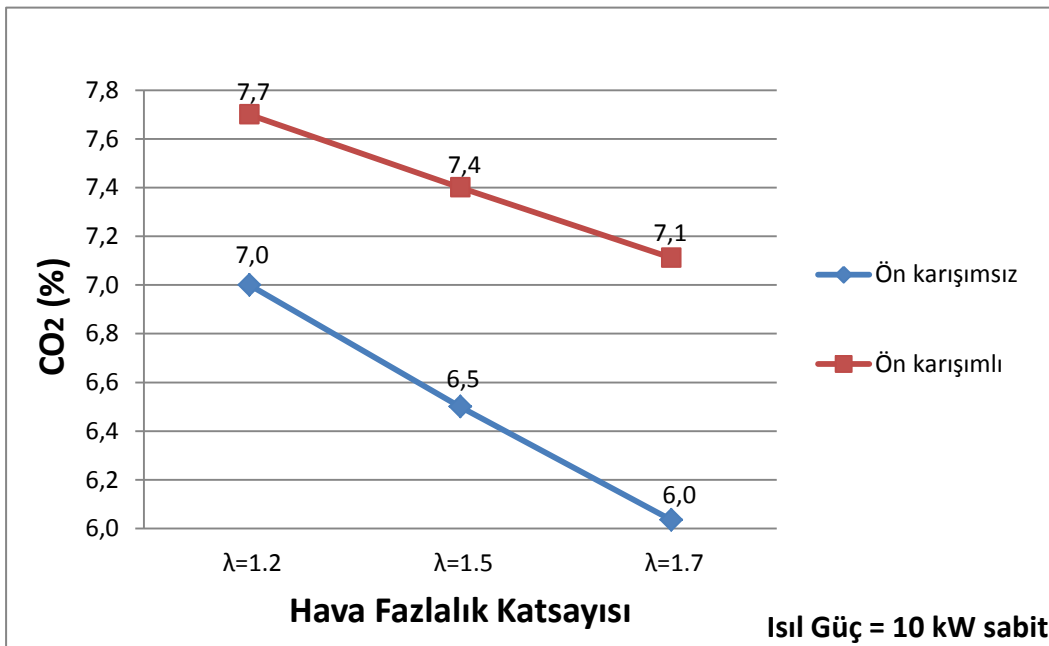
Ön-karışimsız ve ön-karışimli metan alevleri için, 10 kW ısı güçte $\lambda=1,2$, $\lambda=1,5$ ve $\lambda=1,7$ hava fazlalık



Şekil 8. Hava fazlalık katsayısının yanma ürünlerinin sıcaklıklarına etkisi (Effect of excess air ratio on flue gas temperatures)

değerlerinde yanma ürünlerinin sıcaklık değerlerinin değişim grafiği Şekil 8'de gösterilmiştir. Şekil 8'den de görüleceği gibi hava fazlalık değeri arttıkça, yanma ürünlerinin sıcaklık değerlerinin her iki durum için de

değerlerinde baca gazı emisyon değerlerinin değişim grafikleri sırasıyla Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmektedir. Şekil 9'da görüldüğü gibi, hava fazlalık katsayısı arttırıldıkça, baca gazı CO_2

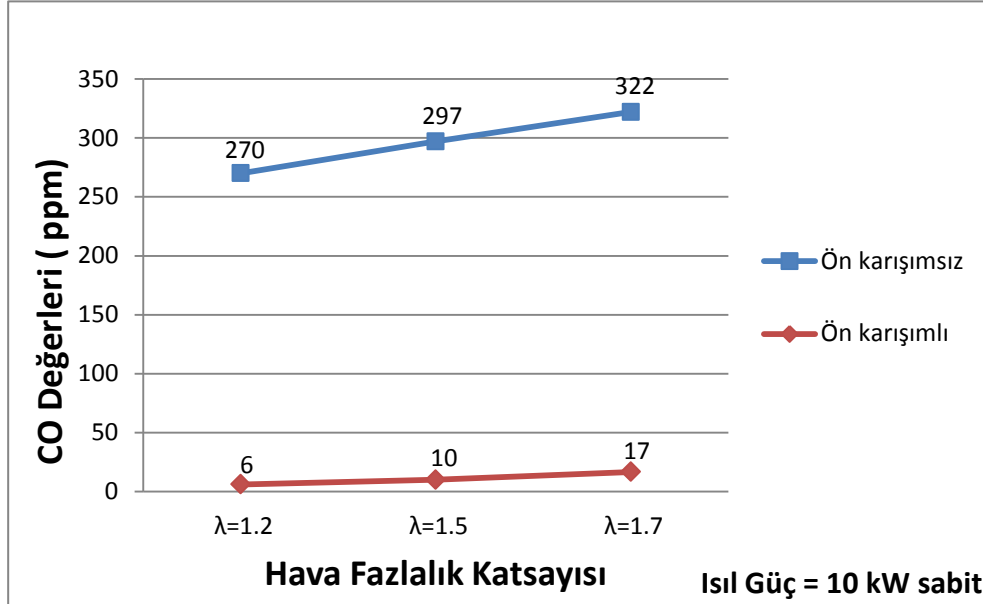


Şekil 9. Hava fazlalık katsayısının CO_2 emisyonlarına etkisi (Effect of excess air ratio on CO_2 emissions)

emisyonda kademeli olarak düşüş gözlemlenmektedir. Bunun nedeninin, % olarak O_2 emisyonlarının artması ve % olarak CO_2 emisyonlarının düşmesinin yanında sıcaklık düştükçe yanma sonu CO_2 emisyonlarının da düşmesi olduğu düşünülmektedir.

Şekil 9'da farklı hava fazlalık katsayıları için baca gazı CO_2 değerlerinin değişim grafiği gösterilmiştir. Şekil

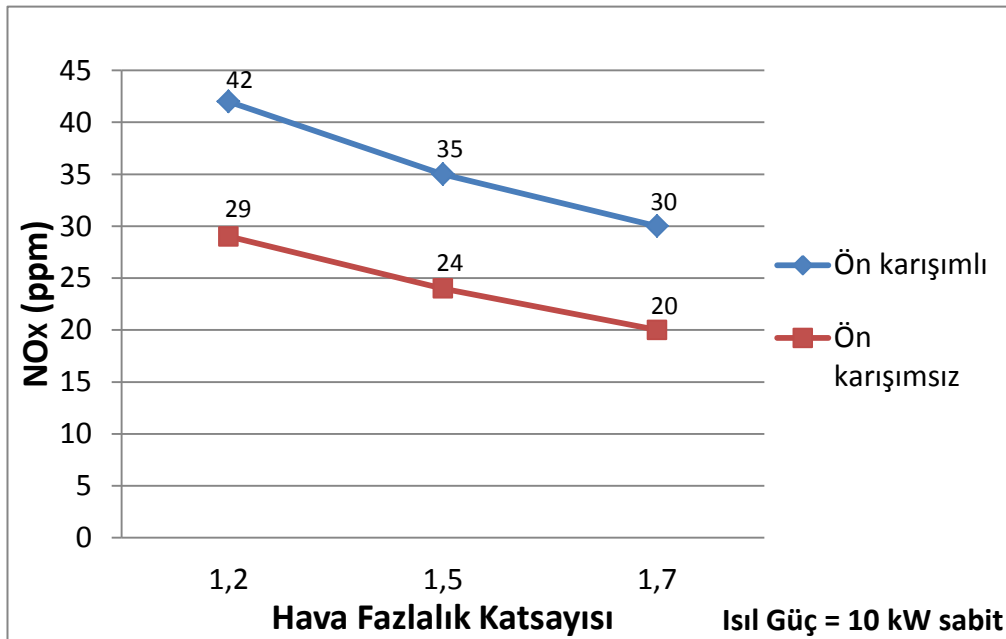
Şekil 10, ön-karışimsız ve ön-karışimli metan alevleri için hava fazlalık katsayısının CO emisyonlarına olan etkileri gösterilmiştir. Şekil 10'da gösterildiği gibi hava fazlalık katsayısı arttırıldıkça ön-karışimsız metan alevi için CO emisyonlarında artış gözlemlenmiştir. 1,2 hava fazlalık katsayısı için, ön-karışimli metan alevinin CO emisyonu 6 ppm, ön-karışimsız metan alevinin CO



Şekil 10. Hava fazlalık katsayısının CO emisyonlarına etkisi (Effect of excess air ratio on CO emissions)

9'a bakıldığı zaman, hava fazlalık katsayısı arttırıldıkça, baca gazındaki CO_2 değerlerindeki azalma görülmektedir. Bunun temel nedeni, daha fazla miktarda gönderilen hava (dolayısıyla O_2 ve N_2), baca gazındaki toplam emisyon miktarlarını arttırmakta ve % olarak değerlendirildiğinde CO_2 miktarını azaltmaktadır.

emisyonu 270 ppm iken, 1,7 hava fazlalık katsayısı değeri için bu değerler sırasıyla, 17 ppm ve 322 ppm olarak ölçülmüştür. Hava fazlalık katsayısındaki değişimin her iki alev tipi için de CO emisyonları üzerinde kayda değer bir değişime neden olmadığı gözlemlenmiştir.



Şekil 11. Hava fazlalık katsayısının NO_x emisyonlarına etkisi (Effect of excess air ratio on NO_x emissions)

Şekil 11’de ise hava fazlalık katsayısının yanma sonu NO_x emisyonlarına olan etkisi gösterilmiştir. Grafik incelendiğinde, hava fazlalık katsayısı arttıkça, yanma sonu NO_x emisyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. NO_x büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olup (ısı NO_x mekanizması) yanma sonu yanma ürünlerinin sıcaklıkları, hava fazlalık katsayısı arttıkça azaldığı için rağmen (Şekil 8) NO_x değerleri de beklediği gibi azalmıştır. 1,2 hava fazlalık katsayısı yanma şartlarında, ön-karışimsız metan alevinin baca NO_x değeri 29 ppm iken, 1,7 hava fazlalık katsayısında bu değer 20 ppm’e kadar gerilemiştir.

4. BULGULAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, ön-karışimli ve ön-karışimsız metan alevlerinde, mevcut bir yanma odasının baca gazından alınan yanma ürünlerinin sıcaklık ve emisyon değerleri, farklı ısı güç ve farklı hava fazlalık katsayıları için deneysel olarak araştırılmış ve aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- Ön-karışimli metan alevi neticesine ölçülen yanma ürünlerinin sıcaklık değerleri, yanma öncesi karışımın daha iyi olması neticesinde, ön-karışimsız metan alevine göre daha yüksek olmuştur. Ayrıca bu durumda, CO_2 değerleri de, C atomlarının CO_2 ’e daha iyi dönüşmesi neticesinde daha yüksek ve CO emisyonları da buna bağlı olarak daha düşük olmuştur. NO_x emisyon değerleri de sıcaklığa bağlı olarak, ön-karışimli metan alevi bacasında nispeten daha yüksek olmuştur (Çizelge 2).
- Metan brülörlerinin ısı güçü arttırıldıkça (beslenen yakıt miktarı arttırıldıkça), yanma sonu ürün sıcaklıklarının her iki alev tipi için de arttığı, CO emisyonlarının azaldığı ve sıcaklığa bağlı olarak NO_x emisyonlarında da artış olduğu ortaya konulmuştur.
- Hava fazlalık değerlerinin arttırılması neticesinde, her iki alev tipi için de yanma sonu ürünlerinin sıcaklıklarında, CO_2 ve NO_x emisyonlarında kayda değer düşüşler olduğu belirlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, “114M668” kodlu TÜBİTAK projesi kapsamında kurulan deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazarlar olarak, katkılarından dolayı TÜBİTAK’a teşekkürü bir borç biliriz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Fackler, K. B., Karalus, M. F., Novosselov, I. V., Kramlich, J. C. and Malte, P. C., “Experimental and numerical study of NO_x formation from the lean premixed combustion of CH_4 mixed with CO_2 and N_2 ”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 133, 121502, 1-7 (2011).
2. Littlejohn, D. and Cheng, R. K., “Fuel effects on a low swirl injector for lean premixed gas turbines”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 31, 3155-3162 (2007).
3. Yılmaz, I. “Effect of Swirl Number on Combustion Characteristics in a Natural Gas Diffusion Flame” *Journal of Energy Resources Technology*, 135 (4), 042204 (2013).
4. Feyz, M. E, Esfahani, J.A., Pishbin, I. and Modarres Razavi, S. M. R. “Effect of recess length on the flame parameters and combustion performance of a low swirl burner” *Applied Thermal Engineering*, 89, 609-617 (2015).
5. Khalid Saqr, M. A., Hossam Aly, S. B., Mohsin Sies, M. A. and Mazlan Wahid, A. “ Effect of free stream turbulence on NO_x and soot formation in turbulent diffusion CH_4 -air flames” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 611–617 (2010).
6. Yegian, D.T. and Cheng, R.K. ” Development of a Lean Premixed Low-Swirl Burner for Low NO_x Practical Applications” *Combustion Science and Technology*, 139:1,207-227, (2007)
7. Wang, F., Xie, X., Jiang, Q and Zhou, L. “Effect of turbulence on NO formation in swirling combustion” *Chinese Journal of Aeronautics*, 27, 797–804 (2014).
8. Çilingir, K., “Ön-karışimsız ve ön-karışimli doğalgaz alevlerinin baca gazı emisyonlarının karşılaştırılması”, *Lisans Bitirme Tezi*, Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 2016, ANKARA.
9. Lieuwen, T. C., Yang, V., Yetter, R. “Synthesis Gas Combustion Fundamentals and Applications” *Taylor & Francis Group*, Boca Raton, USA, 2010.

TiO₂ İçeren Nanoakışkan Kullanımının Isı Borusu Performansına Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Erdem ÇİFTÇİ, Adnan SÖZEN, Esra KARAMAN

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

(Geliş / Received : 23.01.2016 ; Kabul / Accepted : 28.03.2016)

ÖZ

Bu çalışma ile nano boyutta TiO₂ (Titanyum dioksit) parçacıkları içeren nanoakışkan kullanılarak çift fazlı kapalı bir termosifonun (ısı borusu) ısıl performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan ısı borusu 1 m uzunluğunda, iç ve dış çapı sırasıyla 13 mm ve 15 mm olan bakır bir borudur. Isı borusunun 400 mm'lik kısımları yoğuşma ve buharlaşma bölgelerini, geriye kalan 200 mm'lik kısmı ise adyabatik bölgeyi oluşturmaktadır. Yapılan deneysel çalışmada ısı borusunun toplam hacminin 1/3'lük kısmı iş akışkanı ile doldurulmuştur. Yoğuşma bölümünden çekilen ısıyı saptamak amacıyla 3 farklı soğutma suyu debisi (5 g/s, 7.5 g/s ve 10 g/s) ve buharlaşma bölgesi için 3 farklı ısıtıcı gücü (200 W, 300 W ve 400 W) kullanılarak deneyler tamamlanmıştır. Deneyler su ve nanoakışkan için ayrı ayrı yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. En iyi sonuç, ısıl performansta %16.5 oranında iyileşme sağlayan, iş akışkanı olarak nanoakışkanın kullanıldığı 200 W ısıtıcı gücü ve 5 g/s soğutma suyu debisinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isı borusu, nanoakışkan, performans

Experimental Investigation of Nano fluid Usage Including TiO₂ on The Effect of Heat Pipe Performance

ABSTRACT

By this study, it is aimed to improve the thermal performance of the two phase closed thermosyphon (TPCT) using nano fluid that contains TiO₂ particles. The heat pipe utilizing in this work had 1 m length. Its inner and outer diameters were 13 mm and 15 mm, respectively. While both the evaporator and the condenser sections had 400 mm length, the rest 200 mm length of the pipe consisted of adiabatic section. In experimental study performed, one third of the overall volume of the heat pipe was filled with working fluid. In order to determine the heat amount extracting from the condenser section, 3 different mass flow rates of cooling water (5 g/s, 7.5 g/s and 10 g/s) was used. The experiments, in addition, were completed for 3 varied heater power (200 W, 300 W and 400 W) for evaporating the working fluid. They were conducted separately not merely for the water, but also the nano fluid and the findings were compared to each other. The best result was acquired from the experiment in which working fluid was nano fluid with the cooling water mass flow rate of 5 g/s and 200 W heater power.

Keywords: Heat pipe, nano fluid, performance

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda yayınlanmış bir raporda, dünya enerji tüketiminde 2035 yılına kadar % 47 oranında bir artış meydana geleceği öngörülmektedir. Ayrıca fosil yakıt kaynaklı karbon emisyonları da 1900'lü yıllardan beri artmaktadır [1]. Her geçen gün artan enerji talebi ve çevre ile ilgili sorunlar, enerjinin daha verimli kullanılmasını zorunlu hale getirmiştir. Bu amaç doğrultusunda mevcut sistemler üzerinde yapılan iyileştirme çalışmaları da günümüzde bir hayli hız kazanmıştır.

Isı transferi uygulamalarında en önemli parametreler verimlilik ve hız kavramlarıdır [2]. Isıl iletkenliği yüksek olan ısı borularının ısı transferinde sağladığı verimlilik ve hız özelliklerinin yanı sıra; düşük maliyet, bakım maliyetinin yok denecek kadar az olması ve arzu edilen her boyutta imal edilebilmesi de bu cihazların ilgi odağı haline gelmesini sağlamıştır. Isı borusu, iç içe geçmiş iki boru içerisinde yer alan bir iş akışkanının sıcaklık etkisiyle buharlaşması-yoğunlaşması prensibi ile çalışan bir cihazdır. Düşük sıcaklıklarda buharlaşma özelliğine sahip bir akışkanın iş akışkanı olarak kullanıldığı bu cihazlarda, sıcaklık etkisiyle sıvı fazdan buhar fazına geçen iş akışkanı, vakumlu ortamın ve doğal taşınımın etkisiyle yükselerek sahip olduğu ısı enerjisini bir bölgeden başka bir bölgeye taşır.

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: asozen@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 367-376

Yükseldiği bölgeye enerjisini bıraktıktan sonra da kaybettiği sıcaklık nedeniyle yoğunlaşır (sıvı faza geçer) ve yerçekiminin etkisiyle tekrar aşağı doğru hareket eder. Genel olarak bir ısı borusu; yoğunlaşma (kondenser), buharlaşma (evaporatör) ve adyabatik (yalıtımlı) bölge olmak üzere 3 kısımdan oluşur. Isı borusu içerisindeki akışkanın bir sıcaklık değişimi söz konusu olduğunda (evaporatör bölgesinden ısı girişi) akışkan buhar fazına geçerek yükselir ve de buradaki daha düşük sıcaklığın etkisiyle yoğunlaşmaya başlayarak sıvı fazına geçer. Sıvı fazındaki akışkan ise yer çekiminin etkisiyle tekrar buharlaştırıcı bölgesine ulaşır. (Şekil 1) Sisteme ısı girişi sürekli olduğunda da bu işlem periyodik olarak gerçekleşmektedir. Kısaca, iş akışkanının faz değişiminden yararlanarak ısının bir bölgeden başka bir bölgeye taşındığını söylemek mümkündür.

Isı borularında performansı artırmanın iki yolu vardır. Bunlardan biri düşük sıcaklıkta faz değiştiren bir akışkanın iş akışkanı olarak kullanılması, diğeri ise ısı transferinin gerçekleştiği yüzey alanının (ısı iletkenliğinin) artırılmasıdır. Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılmak üzere su içerisine nano boyutta hazırlanmış TiO_2 -bir metal oksit çeşidi- parçacıklarının eklenmesi ile ısı iletkenliğinin artırılması ve bu sayede performansta iyileştirme yapılması öngörülmüştür. Su içerisine eklenen nano parçacıklar ile oluşturulan bu çözelti, nanoakışkan olarak adlandırılmaktadır. Son yıllarda nanoakışkanların ısı borularında kullanılmasına yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar şöyle özetlenebilir:

Tsai ve diğ. (2004), 6 mm iç çapa ve 170 mm uzunluğa sahip bakır, silindirik örgü fitil ısı borusunda gerçekleştirdikleri deneylerinde altın parçacıkları içeren nanoakışkan kullanmışlardır. Çalışma sonucunda ısı borusunun ısıl direncinin %20 ile %37 oranında azaldığını bulmuşlardır [3].

Chen ve diğ. (2008), farklı güç girişlerinde (20 W-40 W) ortalama çapı 35 nm olan su bazlı gümüş nanoakışkanlar kullanarak düz örgü fitil ısı borusunun performansını incelemişlerdir. Nanoakışkan kullanarak yaptıkları deneylerde, ısı borusunun ısıl direncinde saf su kullanılan ısı borusuna kıyasla bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir [4].

Qu ve diğ. (2010), kapalı devre titreşimli ısı borusunda su bazlı Al_2O_3 nanoakışkan kullanımının ısıl performansta oluşturacağı etkiye dair deneysel bir çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında kullandıkları ısı borusu 2 mm iç ve 3 mm dış çapa sahip bakır bir borudur. Deneysel sonuçlarda güç girişi 58.8 W iken, %0.9 konsantrasyondaki metal parçacıkların saf su ile karşılaştırılarak oluşturulduğu nanoakışkan kullanıldığında ısıl direncin % 32.5 oranında azaldığını saptamışlardır [5].

Huminc ve diğ. (2011), termosifon tipi ısı borusunda saf su ve %2 ile %5.3 konsantrasyonunda hazırlanmış demir oksit nanoakışkanları ile deneyler yapmışlardır. Elde edilen sonuçlara göre %5.3 derişime sahip olan nanoakışkan kullanımında suya göre ısıl performansta iyileşmeler olduğunu gözlemlemişlerdir [6].

Chen ve diğ. (2013), malzemesi bakır olan düz bir ısı borusunun ısıl performansını belirlemek amacıyla deneysel bir çalışma yapmışlardır. İş akışkanı olarak su, etanol ve nano akışkan kullandıkları bu çalışmada; çalışma sıcaklığı, çalışma basıncı ve kullanılan iş akışkanı gibi performansı belirleyen parametrelerin ısı verim üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nanoakışkan kullanımının ısıl performansı artırdığı ve bu akışkanları ısı borularında kullanılabilecek yeni tip akışkanlar olduğu sonucuna varmışlardır [7].

Sarafraz ve diğ. (2014), biyolojik olarak üretilmiş, çevre dostu bir iş akışkanının kullanıldığı fitilsiz termosifon tipi bir ısı borusunun performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında iç çapı 10,7 mm, dış çapı 12 mm ve boyu 280 mm olan bakır bir ısı borusu kullanmışlardır. Evaporatör bölgesinden sabit ısı akısı uygulayarak kondenser bölgesinde tasarladıkları soğuma ceketine olan ısı geçişini gözlemlemişlerdir. Doldurma oranı, ısı borusu eğim açısı, nano parçacık derişimi gibi çalışma parametrelerinin ısıl performans üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Nano akışkan kullanarak ısı borusu performansının artırılmasıyla birlikte ısıl direncin de azarlatılabileceğini göstermişlerdir [8].

Tharayil ve diğ. (2015), grafen-su çiftinin oluşturduğu nanoakışkan kullanarak ısı borusu performansını analiz etmişlerdir. Dikey pozisyonda, 20 W ile 380 W arasında uygulanan ısıl yüklerde farklı derişimlerde nanoakışkanlar kullanarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarının sonucunda ısı borularında nanoakışkan kullanımının ısıl performansı artırdığını ve evaporatör ara yüz sıcaklığını azalttığını, ayrıca optimum nano akışkan derişiminde (% 0,006) ısı transferindeki iyileşmenin maksimum olduğunu gözlemlemişlerdir [9].

Lin ve diğ. (2015), çubuk biçiminde ZnO partikülleri içeren nanoakışkan kullanarak türbülanslı akışın hakim olduğu bir boruda sayısal analizler yapmışlardır. Değişken Reynolds sayılarına karşılık gelen Nusselt sayılarını hesaplayarak derişimlerini gözlemlemişlerdir. Su ve nanoakışkan için Nusselt sayılarının artan Reynolds sayılarına paralel olarak arttığını ve nano akışkanın ısı transfer miktarını artırdığını bulmuşlardır [10].

Sadeghinezhad ve diğ. (2016), sinterlenmiş bir ısı borusunun ısıl performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Grafen-su ve saf su kullanarak yaptıkları deneysel çalışmalarında ısı borusunu iki farklı pozisyonda (yatayla 0° ve 60° açı yapacak biçimde) tutarak 4 farklı ısıtıcı gücü için sonuçlar elde etmişlerdir. Saf su yerine nanoakışkan kullanarak ısıl dirençte maksimum % 48,4 oranında bir düşüş gözlemlemişlerdir. ısıl iletkenlikteki iyileşme oranının en büyük değerini ise 60° eğim açısı ve 60 W ısıtıcı gücünde % 37,2 olarak bulmuşlardır [11].

Katılar sıvılara göre daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip olduklarından; nanoakışkanlar ısı borularının performan-sını iyileştirmede başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [12-15]. Bu çalışmada TiO_2 metal oksit

parçacıkları içeren sulu çözelti ısı borusundaki iş akışkanı olarak kullanılmıştır. Nanoakışkanların sahip oldukları yüksek ısıl iletkenlik özelliğinden faydalanılarak ısı borusu performansının iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

2.1. Nanoakışkanın Hazırlanması (Nanofluid Preparation)

Yapılan deneysel çalışmada, boyutları 100 nm'den küçük olacak şekilde elde edilen % 2 oranındaki TiO₂ metal oksit parçacıkları saf su ile karıştırılmıştır. Elde edilen süspansiyon ultrasonik banyoda 5 saat bekletilmiştir. Çözelti içerisindeki çökelmeleri önlemek amacıyla karışıma yüzey aktifleştirici olarak %0,2 oranında Triton X-100 ilave edilmiştir. Ultrasonik banyoda bekletme işleminde saf su-TiO₂ partikülleri karışımına (nanoakışkan) ultrasonik titreşimler gönderilerek homojen ve kararlı bir karışım elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan ultrasonik banyonun teknik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Ultrasonik banyoya ait özellikler (Specifications of the ultrasonich bath)

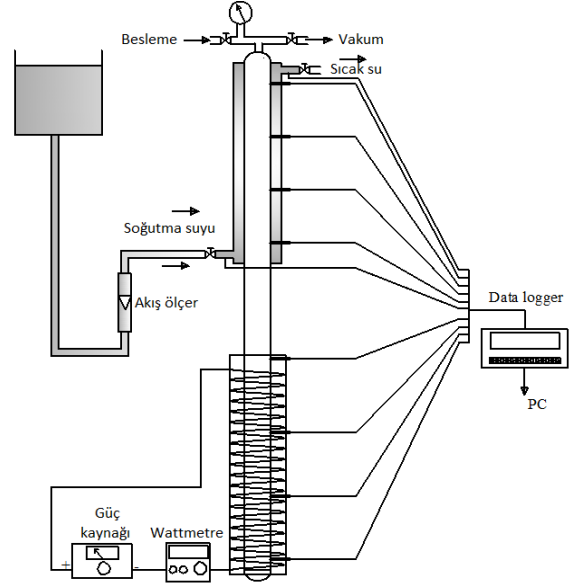
Özellik	Değer
Voltaj (V / Hz)	230 / 50
Ultrasonik Güç (Peak /W)	600 / 300
Ultrasonik Frekans (kHz)	28

2.2. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

Deney düzeneğinin şematik olarak görünümü ve deney düzeneğine ait bir fotoğraf Şekil 2 ve Şekil 3'te verilmiştir. Deneyde kullanılan ısı borusu 1000 mm uzunluğa, 13 mm iç çapa ve 15 mm dış çapa sahiptir. Malzemesi bakır olan borunun buharlaşma ve yoğunlaşma bölgeleri 400 mm uzunluğuna sahip olmasına karşın adyabatik bölgesi 200 mm uzunluğundadır. Borunun buharlaşma bölümü Ni-Cr kablodan oluşan, ortalama gücü 1500 W olan bir elektrikli ısıtıcı kullanılarak ısıtılmıştır. Isıtıcı tamamen yalıtılmıştır. Buradaki giriş gücü ölçülmüş ve bir wattmetre aracılığıyla (Fluke-43b analyzer) görüntülenmiştir. Güç Watt cinsinden deneysel olarak ölçülmüştür. Isıtıcı yani buharlaşma bölgesi tamamıyla yalıtılmış ve buna istinaden deneysel olarak ölçülen ısıtıcı gücünün tamamıyla iş akışkanına aktarıldığı kabul edilmiştir. Isı borusunun yoğunlaşma bölümü, bu bölüm dışına yapılan bir cep vasıtasıyla soğutulmaktadır. Isı cep içerisinde dolaşan soğutucu akışkan aracılığıyla kondenserden atılmıştır. Soğutucu akışkanın debisini ayarlamak ve gerektiği zaman kontrol altında tutmak amacıyla bir akış ölçer kullanılmıştır. Sistemdeki ısı kaybını en aza indirmek için ısı borusunun tüm bölümleri cam yünü ile yalıtılmıştır.

Isı borusu duvarı boyunca ısı dağılımını gözlemlemek için 10 adet termokupl (K- tipi) kullanılmıştır. Soğutucu akışkanın sıcaklık değişimini gözlemlemek amacıyla bu termokuplların 4 adeti yoğunlaşma bölümü, 4 adeti buharlaşma bölümü ve 2 adeti de soğutucu giriş-çıkışına yerleştirilmiştir. Şekil 4'de termokuplların ısı borusu üzerindeki yerleşimleri görülmektedir. Temokupl kayıtları datalogger (E-680 Elimko, Türkiye) kullanılarak görüntülenmiştir.

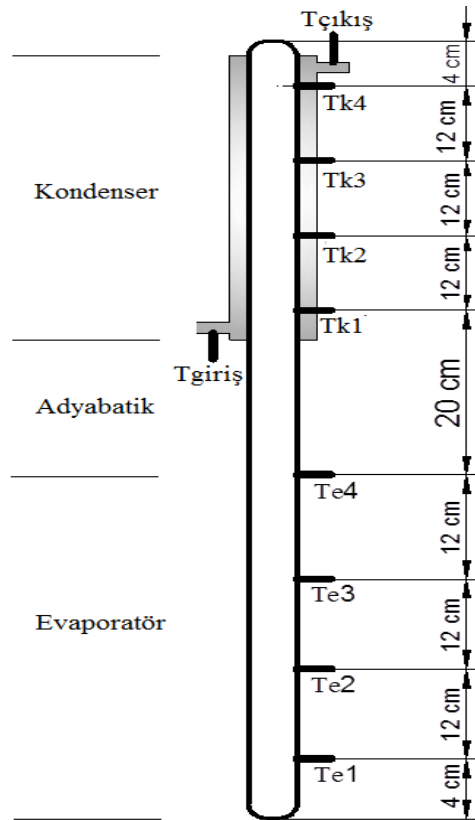
Sistemde kullanılan iş akışkanının debisi kullanılan akışkanın türünü gözetmeksizin 44,2 ml değerinde sabit tutulmuştur. Bu değer ısı borusundaki toplam hacmin 1/3'üne karşılık gelmektedir. Deneyler sırasında ısı borusu yatayla 90° açı yapacak şekilde tutulmuştur. Giriş gücü 200 W ile 400 W aralığında 100 W farkla uygulanmıştır. Kondenserdeki iş akışkanını yoğunlaştırmada kullanılan soğutma suyunun debisi 3 farklı değere (5 g/s, 7,5 g/s ve 10 g/s) ayarlanmıştır.



Şekil 1. Deney düzeneğinin şematik görünümü (The schematic digram of experimental setup)



Şekil 2. Deney düzeneğinin genel görünümü (A general view of the experimental setup)



Şekil 3. Isı borusu üzerine yerleştirilen termokuplların dağılımı (The distribution of the thermocouples mounted on the heat pipe)

2.3. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Çizelge 2. Ölçüm cihazlarının teknik özellikleri, hassasiyetleri ve toplam belirsizlikleri (Technical properties of measurement equipments, accuracy, total uncertainty)

Cihaz	Teknik Özellikler	Hassasiyet	Toplam Belirsizlik
Termokupl (Data logger, Elimko E-680 model)	K tipi; ölçüm aralığı - 200°C - + 1200°C	± % 0.5 °C	± % 1.224 °C
Debimetre	Ölçüm aralığı 0-12 g/s	± 0.01 g/s	± 0.0141 g/s
Wattmetre	Fluke-43b analizyer	± 1 W	± 1.414 W

Deneyel çalışmada kullanılan cihaz ve ekipmanlardan kaynaklanan belirsizlikler, belirsizlik analizi ile çözümlenmiştir. Cihaz seçimi, deney şartları, kullanılan cihazların kalibrasyonu, verilerin okunması, ölçüm aletlerinin bağlantı noktaları ve deneyin yapıldığı ortam gibi deney sonuçlarını etkileyen (hata ve belirsizliklere yol açan) birçok parametre vardır. Bu nedenle arzu edilen deney standartları belirsizlik analizi yapılarak elde edilebilir. S sonucu bağımsız değişkenler (x_1, x_2, \dots, x_n) cinsinden verilen bir fonksiyon, W_s sonuçlardaki belirsizlik ve w_1, w_2, \dots, w_n bağımsız değişkenlerdeki belirsizlikler olsun. Bağımsız değişkenlerdeki belirsizliklerin hepsinin aynı oranda verilmesi durumunda, sonuçlardaki belirsizlik de aynı oranda olacaktır (Eş.1).

$$W_s = \left[\left(\frac{\partial S}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial S}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Isı borusunda yapılan deneyler süresince değişkenler ölçülmüştür. Sıcaklık ölçümlerinin toplam belirsizliği; kullanılan termokuplların hassasiyeti, ölçüm probleminin bağlantı noktaları ve ölçüm cihazından okunan sonuçlardaki hatalardan kaynaklanmaktadır. Sıcaklık ölçümlerinin belirsizliği Eş. 2'de verilen bağıntıyla hesaplanmıştır.

$$W_T = \left[(w_{termokupl})^2 + (w_{baglant,nok})^2 + (w_{okuma})^2 \right]^{1/2} = \quad (2)$$

$$[(0.5)^2 + (1)^2 + (0.5)^2]^{1/2} = 1.224$$

Akış hızını ölçmek için kullanılan debimetrenin belirsizliği ise, debimetreden ve okuma hatasından kaynaklanmaktadır. Debimetrenin belirsizliği, Eş.3'de verilen bağıntıdan hesaplanmıştır.

$$W_m = \left[(w_{debimetre})^2 + (w_{okuma})^2 \right]^{1/2} = \quad (3)$$

$$[(0.01)^2 + (0.01)^2]^{1/2} = 0.0141$$

Elektrikli ısıtıcının belirsizliğinin hesaplanmasında Wattmetre ve bu cihazdan okunan sayısal değerinin büyüklüğü göz önünde bulundurulmuştur (Eş.4).

$$W_{Ph} = \left[(w_{Wattmetre})^2 + (w_{okuma})^2 \right]^{1/2} = \quad (4)$$

$$[(1)^2 + (1)^2]^{1/2} = 1.414$$

Ölçümlen değişkenlerin belirsizlik analizleri sonucu hesaplanan belirsizliklerinin kabul edilebilir aralıklarda olduğu görülmektedir. Ölçüm cihazlarına ait teknik bilgiler ve bu cihazların toplam belirsizlikleri Çizelge 2'de verilmiştir.

3.BULGULAR (FINDINGS)

Kondenser bölgesindeki ısıyı çekmek amacıyla kullanılan soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı, suyun kütsel debisi ve özgül ısı değerleri; soğutucu akışkana olan ısı transferi

miktarını hesaplamada kullanılmıştır.

$$\dot{Q}_k = \dot{m}_k c_p (T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}}) \quad (2)$$

Yoğuşma ile atılan ısının evaporatör alınan ısıya oranı, ısı borusunun verimi olarak tanımlanır.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_k}{\dot{Q}_e} = \frac{\dot{Q}_{\text{çıkış}}}{\dot{Q}_{\text{giriş}}} \quad (3)$$

Burada \dot{Q}_e buharlaşma bölgesinden verilen ısıtıcı gücüdür (200 W, 300 W ve 400 W).

Evaporatör ve kondenser bölümleri arasındaki ısı direnç bu iki bölge arasındaki ortalama sıcaklık farkının ısıtıcı gücüne oranlanmasıyla bulunmuştur.

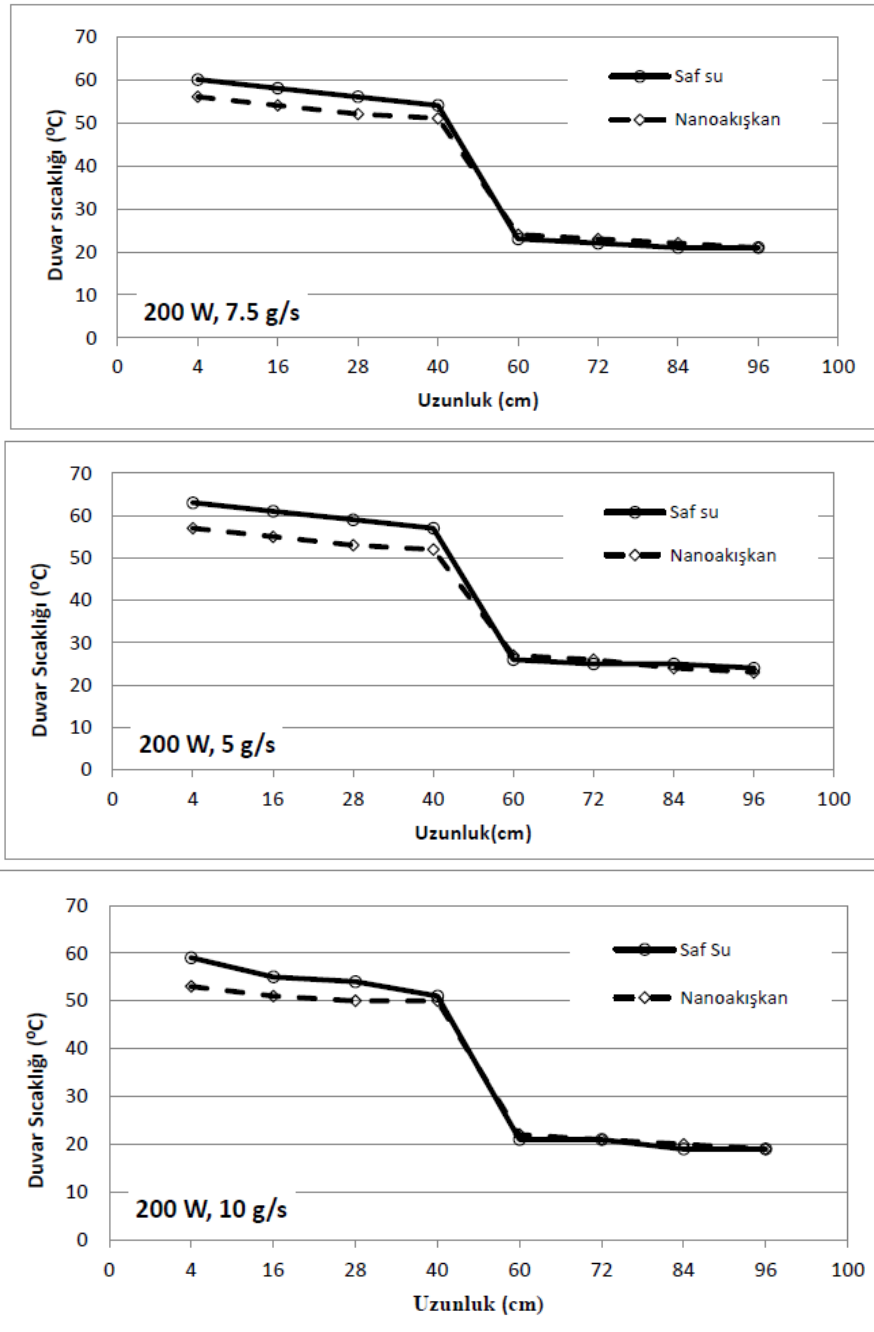
$$R = \frac{\Delta T}{\dot{Q}_{\text{giriş}}} \quad (4)$$

Buradaki ortalama sıcaklık farkı (ΔT) terimi, yoğuşma ve buharlaşma bölgelerinde ölçülen sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalamaları arasındaki fark olarak hesaplanmıştır.

$$\Delta T = \left(\frac{T_{e1} + T_{e2} + T_{e3} + T_{e4}}{4} \right) - \left(\frac{T_{k1} + T_{k2} + T_{k3} + T_{k4}}{4} \right) \quad (5)$$

Isı borusunun verimindeki iyileştirme saf su ve nanoakışkan kullanılarak belirlenmiştir. Deneysel olarak ilk olarak ısı borusunun saf su ve daha sonra TiO₂ metal oksit parçacıkları içeren nanoakışkan ile doldurulmasıyla gerçekleştirilmiştir.

200 W ısıtıcı gücünde ve farklı soğutma suyu debilerinde ısı borusu duvarında ölçülen sıcaklık dağılımları Şekil 4'te gösterilmiştir.

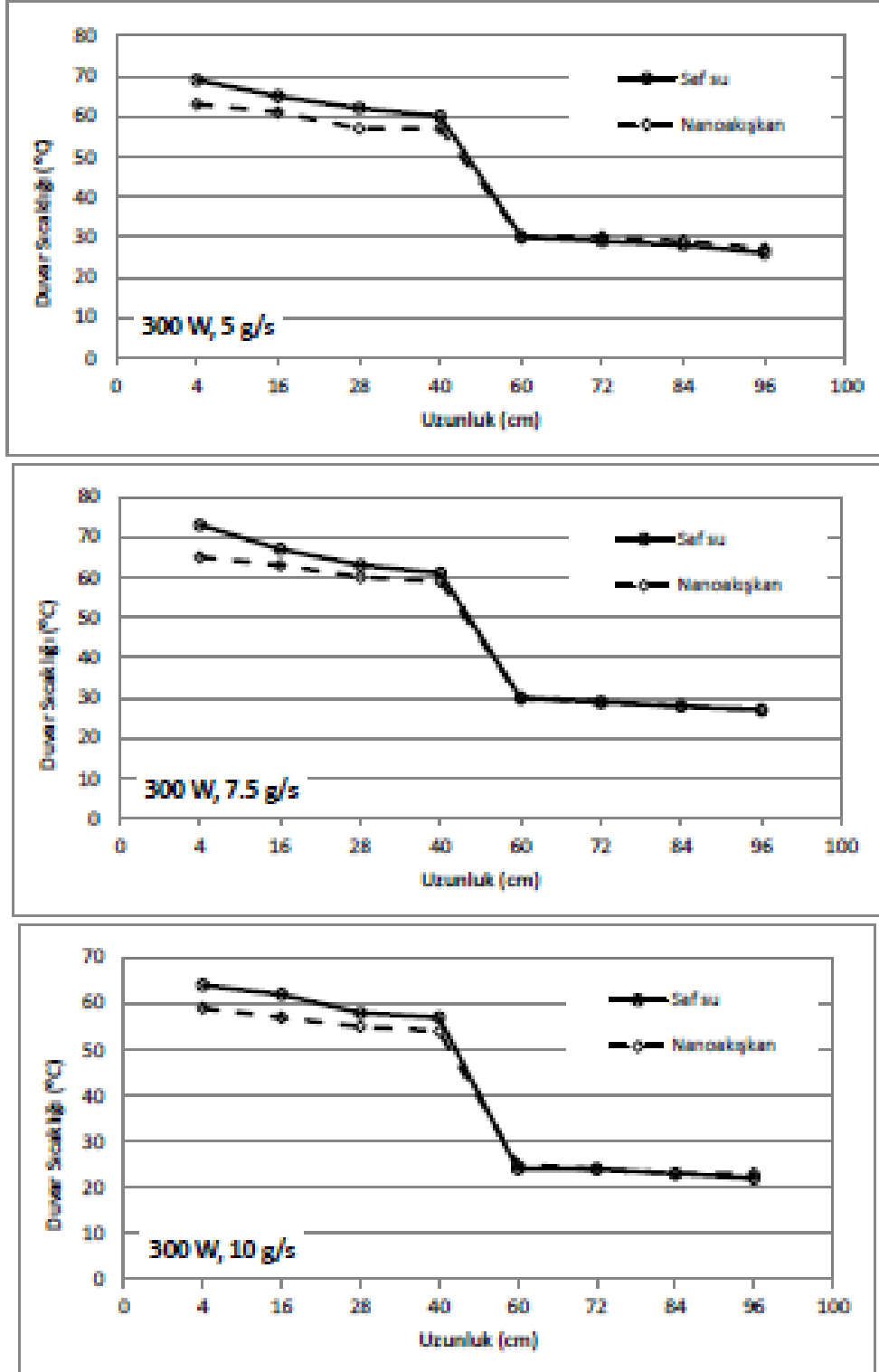


Şekil 4. 200 W ısıtıcı gücünde ölçülen duvar sıcaklıkları (The wall temperatures measured at 200 W heater power)

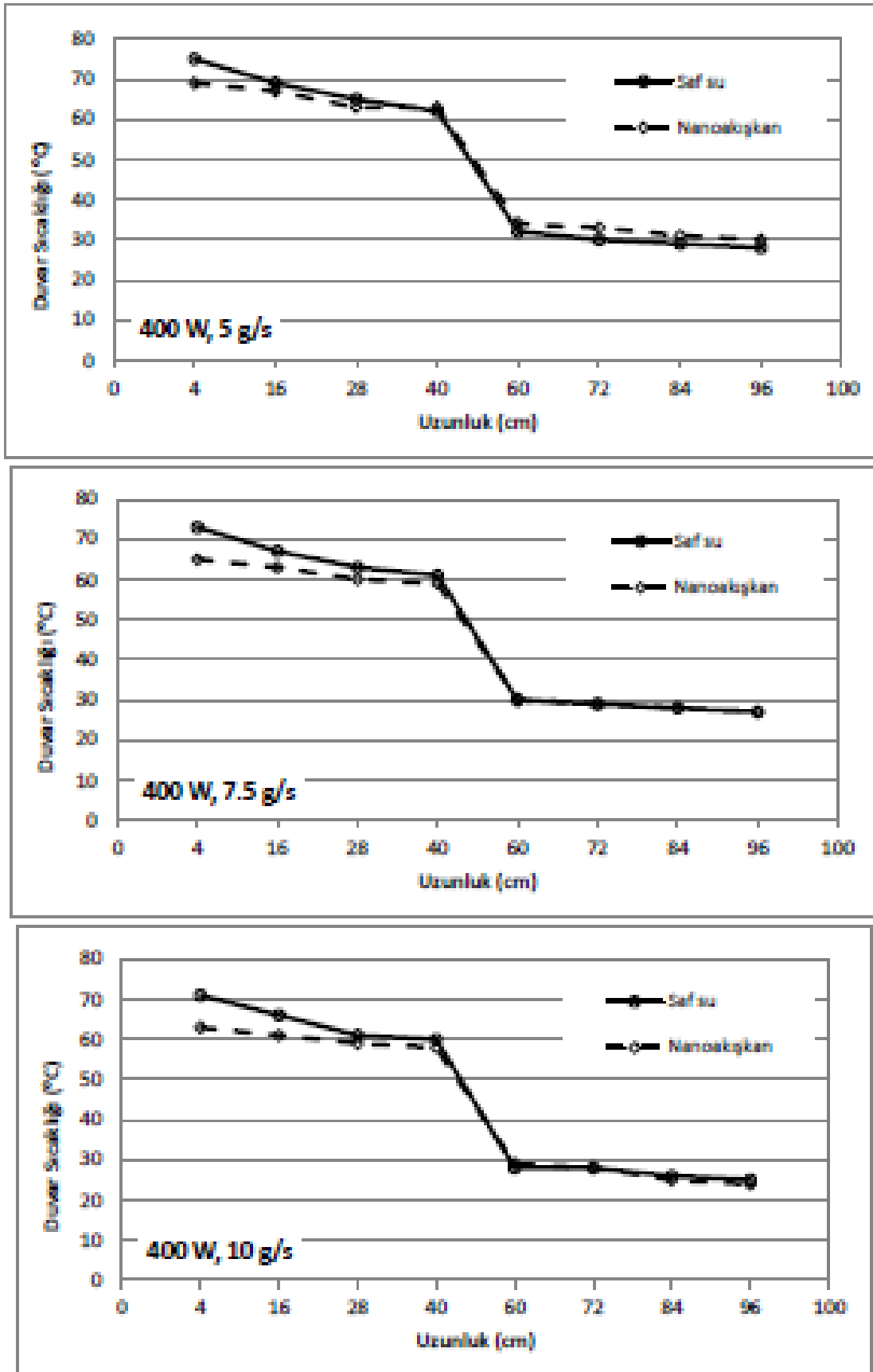
200 W ısıtıcı gücü ile yapılan deneyler sonucunda nanoakışkan kullanımının evaporatör bölümünün ortalama duvar sıcaklıklarını 5°C ile 7°C azalttığı görülmüştür. Bu durum, iş akışkanı olarak saf su yerine nanoakışkan kullanılması durumunda nanoakışkanın yoğuşma bölgesine daha fazla ısı taşıdığını göstermektedir. Şekil 4’de görüldüğü gibi kondenser

bölgesi duvar sıcaklıkları her bir iş akışkanı için çok yakın değerlere sahiptir. Yapılan deneyler sonucunda 200 W ısıtıcı gücü için kondenser bölgesinde ortalama duvar sıcaklığının 23°C olduğu gözlemlenmiştir.

300 W ve 400 ısıtıcı güç değerinde ve farklı soğutma suyu debilerinde ısı borusu duvarında ölçülen sıcaklık dağılımları Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 5. 300 W ısıtıcı gücünde ölçülen duvar sıcaklıkları (The wall temperatures measured at 300 W heater power)



Şekil 6. 400 W ısıtıcı gücünde ölçülen duvar sıcaklıkları (The wall temperatures measured at 400 W heater power)

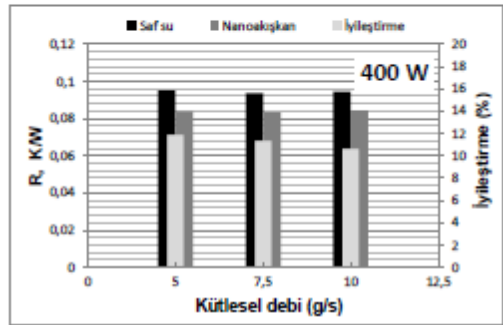
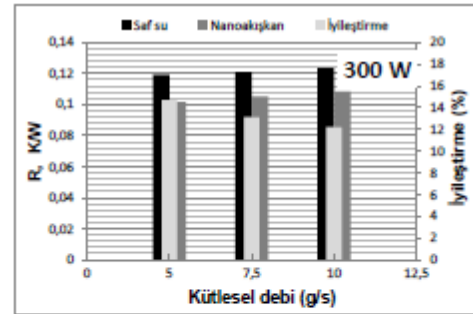
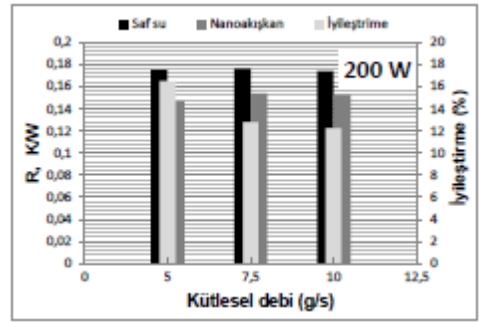
Evaporatör bölgesinden uygulanan 300 W ısıtıcı gücünde ve farklı soğutma suyu debilerinde yapılan deney sonuçlarına göre nanoakışkan kullanımıyla evaporatör bölgesinde daha düşük duvar sıcaklıkları elde edilmiştir (Şekil 5). Aynı çalışma şartları için kondenser bölgesindeki duvar sıcaklıkları ortalama 27°C olarak ölçülmüştür. Deneylerde iş akışkanı olarak kullanılan saf su ve nanoakışkan için ortalama kaynama sıcaklıkları sırasıyla 68,7°C ve 62,3°C olarak hesaplanmıştır. Anlaşılacağı üzere, nanoakışkan kullanımıyla iş akışkanının kaynama noktası sıcaklığında 6,4°C'lik bir düşüş sağlanmıştır.

400 W ısıtıcı gücünde yapılan deney sonuçları incelendiğinde diğer deney sonuçlarına yakın verilerin elde edildiği görülmektedir. Ancak, diğer deney sonuçlarından farklı olarak 400 W ısıtıcı gücü ve 5 g/s soğutma suyu debisinde yapılan deneyde nanoakışkan kullanılan durumda kondenser bölgesindeki ortalama duvar sıcaklığının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Artan ısıtıcı güce karşılık olarak kondenser bölgesindeki soğutma suyu debisinin az olması, bu bölgede gerçekleşen enerji aktarımı sırasında bir miktar enerjinin kondenser duvarlarında hapsedilmesine yol açmıştır. Nanoakışkan kullanımıyla artan ısı transfer alanına rağmen 5 g/s soğutma suyu debisi, 400 W ısıtıcı gücü için soğutma suyu ile iş akışkanı arasında gerçekleşen ısı transferinin etkin gerçekleşmesinde yetersiz kalmıştır.

Elde edilen tüm grafikler incelendiğinde, evaporatör bölümünden kondenser bölümüne doğru ısı borusu duvarındaki sıcaklık dağılımında kademeli bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir. 200 W gücünde ve 10 g/s soğutma suyu debisinde yapılan deney bu gözlemin bir örneği olarak verilebilir. Metal oksit parçacıkları içeren nanoakışkan kullanımıyla, iş akışkanının kaynama sıcaklığının kayda değer miktarda düşürülmüştür. Sonuç olarak, ısı transferi uygulamalarında yaygın olarak kullanılan ısı borularının veriminde önemli ölçüde bir iyileştirme yapıldığı söylenebilir.

Isı borusu duvarındaki en yüksek sıcaklık farkı 9 °C olarak 400 W güc ve 10 g/s soğutma suyu debisindeki nanoakışkan ile yapılan deney sonucu elde edilmiştir.

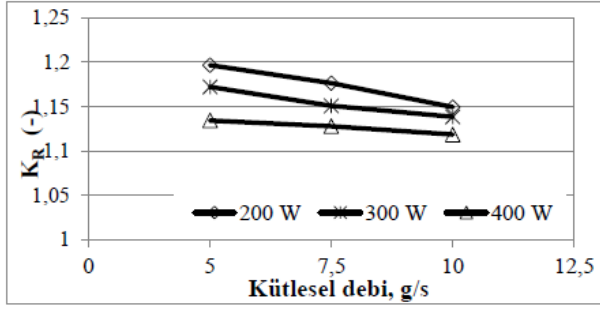
Şekil 7'de, su ve nanoakışkan için ısı direnci (R) ve iyileştirme oranının ısı borusu kondenserindeki değişken soğutucu akışkan debilerine göre değişimi görülmektedir. Düşük ısı yüklerinde hem su hem de nanoakışkan için ısı direnci yüksek olduğu belirlenmesine rağmen, artan ısı yüküne bağlı olarak ısı direnci en küçük değerine ulaşmıştır.



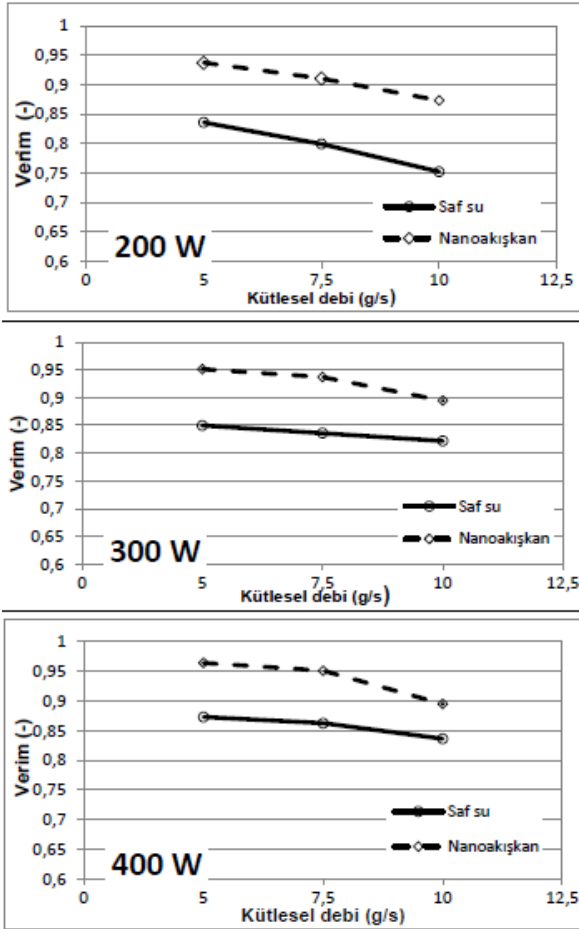
Şekil 7. Isı borusundaki ısı direnci değişimi ve elde edilen iyileştirme miktarları (Distribution of thermal resistance along the heat pipe and obtained improvement)

Isı direnci için iyileştirme miktarındaki en iyi sonuç, % 16,5 oranındaki iyileştirme ile iş akışkanı olarak nanoakışkanın kullanıldığı 200 W ve 5 g/s soğutma suyu debisiyle yapılan deneyde elde edilmiştir. Bu iyileştirmenin en büyük nedeni nanoakışkan içerisinde yer alan TiO₂ parçacıklarının iş akışkanının yüzey alanını, dolayısıyla ısı transfer alanını arttırmasıdır. Ayrıca, nanoakışkan kullanımıyla arttırılan ısı iletkenlik, bu akışkanın kullanıldığı deneylerin daha iyi sonuçlar verdiğini deneysel olarak göstermiştir. İş akışkanı olarak nanoakışkan kullanıldığında, ısıtıcı gücünün artmasıyla akışkana aktarılan ısı transferi hızlanmış ve buna bağlı olarak iş akışkanının evaporatör bölgesine doğru hızla hareket ettiği gözlemlenmiştir. İş akışkanının vakumlu ortam içerisindeki hızının artmasına neden olan bu etken ile boru içerisindeki akış özelliklerinin olumsuz yönde etkilendiği (kayıpların arttığı) düşünülmektedir. 200 W ısıtıcı gücü ve 5 g/s soğutma suyu debisinde elde edilen sonuçlar bunun en belirgin göstergesidir. Bahsi geçen deneyde ısıtıcı gücünün ve soğutma suyu debisinin çok küçük olması

karışım içerisindeki kararsızlığı arttıracak etmenleri elimine etmektedir.



Şekil 8. Isı iletim katsayısında gerçekleşen iyileştirme miktarları (The improvements acquired in heat conductivity values)



Şekil 9. Farklı soğutma suyu debileri ve ısıtıcı güçlerinde ısı borusu veriminin değişimi (Alteration of the heat pipe efficiency toward different cooling water amount and heater power)

Su ve nanoakışkan kullanılarak yapılan deneyler sonucunda; hem su hem de nanoakışkanın ısı iletim katsayısındaki değişimin ısıtıcı gücü ve soğutma suyu debisine bağlı olarak değişimi Şekil 8'de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda nano akışkan kullanımıyla ısı iletim katsayısında (iletkenlik) bir iyileşme olduğu gözlemlenmiştir. İyileştirme oranının en yüksek ve en düşük değerlerine sırasıyla 200 W ısıtıcı gücü, 5 g/s

soğutma suyu debisinde (% 1.19) ve 400 W ısıtıcı gücü, 10 g/s soğutma suyu debisinde yapılan deneylerde ulaşılmıştır. Bu sonuca göre artan ısı iletim katsayısı ile daha hızlı ve daha verimli gerçekleşen ısı transferinin mümkün olacağı söylenebilir.

Kullanılan iş akışkanına bağlı olarak değişen ısı borusunun verimi Şekil 9'da gösterilmiştir

Yapılan deneyler sonucunda, nanoakışkan kullanımının ısı borusu verimini artırdığı gözlemlenmiştir. En yüksek verim, $\eta = 0.95$ ile 400 W ısıtıcı gücü ve 5 g/s soğutma suyu debisinde nanoakışkan kullanılarak yapılan deney sonucu elde edilmiştir. İş akışkanı ne olursa olsun, soğutma suyu debisi arttıkça ısı veriminde bir düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

Isı borularının performanslarını belirlemek amacıyla yapılan bu deneysel çalışmada iş akışkanı olarak kullanılan iki farklı akışkanın performans üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan iş akışkanları, ağırlıkça %2 derişimdeki TiO₂ parçacıkları ile saf suyun karıştırılması sonucu elde edilen TiO₂ nanoakışkanı ve saf sudur. Isı borusuna farklı debiler ve farklı giriş güçleri uygulanarak yapılan deneysel çalışma sonucunda elde edilen çıktılar ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar şu şekildedir:

- Saf su yerine TiO₂ nanoakışkanı kullanıldığında ısı borusunun duvar sıcaklıklarındaki dağılım daha dar bir aralıkta sınırlandırılmıştır. Benzer şekilde, yoğunlaşma ve buharlaşma bölgelerinin duvar sıcaklıkları, iş akışkanı olarak nanoakışkan kullanıldığında daha küçük değerlerde seyretmiştir.
- Nanoakışkan kullanımı ile buharlaşma sıcaklığı ortalama 10°C daha düşük olmuştur.
- Nanoakışkan içerisindeki metal oksit parçacıklarının iş akışkanının iletkenliğini artırdığı, bunun sonucunda da ısı borusunun veriminde artış olduğu görülmüştür. Bu artış miktarı yaklaşık olarak % 11.76 civarındadır.
- Termofiziksel ve kimyasal özellikleri bakımından ısı transferinde etkin rol alabilecek materyallerle yeni tür nanoakışkanlar hazırlanarak ısı borusu veriminin incelendiği deneysel çalışmalar gerçekleştirilebilir.
- Literatürdeki deneysel çalışma sonuçları kullanılarak farklı analiz yöntemleri (teorik analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı gibi) ile performans belirleme çalışmaları yapılabilir ve elde edilen bulgular birbirleriyle kıyaslanabilir.
- Nanoakışkan hazırlama sürecinde farklı özelliklere sahip yüzey aktifleştiriciler kullanılarak bu maddelerin ısı borusunun performansında yaratacağı değişimler gözlemlenebilir.
- Farklı nano boyutlarda üretilen nano parçacıklarla hazırlanan nanoakışkanların iş akışkanı olarak

- kullanılmasıyla, nano parçacık boyutunun performans üzerindeki etkilerinin inceleneceği çalışmalar yapılabilir.
- viii. Nanoakışkanların sadece ısı borularında değil aynı zamanda ısı değiştiricilerinde kullanılmasıyla da bu tür cihazların performans iyileştirmesi yapılabilir.

SİMGE VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

c_p	Özgül ısı [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
\dot{m}	Kütleli debi [gs^{-1}]
R	Isıl direnç [KW^{-1}]
\dot{Q}	Isı transferi [W]
T	Sıcaklık [K]
ΔT	Sıcaklık farkı [K]
η	Verim (-)
ρ	Yoğunluk [kgm^{-3}]
μ	Viskozite [Pa.s]

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Zhang L. Z., 'Conjugate Heat and Mass Transfer in Heat Mass Exchanger Ducts', 1:Elsevier, USA, (2014).
- Çiftçi E., Sözen A., Menlik T. ve Gürü M., 'Füzel Yağı Kullanılarak Isı Borusu Performansının İyileştirilmesi', 3. Anadolu Enerji Sempozyumu(AES), Muğla, 205-212, (2015).
- Chen, Y.T., Wei, W.C., Kang, S.W. and Yu, C.S., 'Effect of Nanofluids on Flat Heat Pipe Thermal Performance', 24th IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium (IEEE), Dallas, (2008).
- Tsai, C.Y., Chien, H.T., Ding, P.P., Chan, B., Luh, T.Y. and Chen, 'Effect of Structural Character of Gold Nanoparticles in Nanofluid on Heat Pipe Thermal Performance', Mater. Lett., 58(9): 1461-1465, (2004).
- Qu, J., Wu, H.Y. and Cheng, P., 'Thermal Performance of an Oscillating Heat Pipe with Al_2O_3 Water Nanofluids', International Communications in Heat and Mass Transfer, 37(2): 111-115, (2010).
- Huminic, G., Huminic, A., Morjan, I. and Dumitrache, F., 'Experimental Study Of The Thermal Performance Of Thermosyphon Heat Pipe Using Iron Oxide Nanoparticles', International Journal of Heat And Mass Transfer, 54(1):656-661, (2011).
- Chen, .Y-J., Wang, P.-Y., Liu, Z.-H. and Li, Y.-Y., "Heat transfer characteristics of a new type of copper wire-bonded flat heat pipe using nanofluids", International Journal of Heat and Mass Transfer, 67:548-559, (2013).
- Sarafraz, M. M., Hormozi, F. and Peyghambarzadeh, S. M., "Thermal performance and efficiency of a thermosyphon heat pipe working with a biologically ecofriendly nanofluid", International Communications in Heat and Mass Transfer, 57:297-303, (2014).
- Tharayil, T., Asirvatham, L. G., Ravindran, V. and Wongwises, S. "Thermal performance of miniature loop heat pipe with graphene-water nano Fluid", International Journal of Heat and Mass Transfer", 93:657-968, (2015).
- Lin, J. Z., Xia, Y. and Ku, X. K., "Flow and heat transfer characteristics of nanofluids containing rod-like particles in a turbulent pipe flow", International Journal of Heat and Mass Transfer, 93:57-66, (2015).
- Sadeghinezhad, E., Mehrli, M., Rosen, M. A., Akhiani, A. R., Latibari, S. T., Mehrli, M and Metselaar, H. S. C., "Experimental investigation of the effect of graphene nanofluids on heat pipe thermal performance", Applied Thermal Engineering, 100:775-787, (2016).
- S. Khandekar, Y.M. Joshi and B. Mehta, 'Thermal Performance of Closed Two-Phase Thermosyphon Using Nanofluids', International Journal of Thermal Sciences, 47: 659-667, (2008).
- P. Naphon, P. Assadamongkol and T. Borirak, 'Experimental Investigation of Titanium Nanofluids on The Heat Pipe Thermal Efficiency', International Communications in Heat and Mass Transfer, 35: 1316-1319, (2008).
- Naphon, D. Thongkum and P. Assadamongkol, 'Heat Pipe Efficiency Enhancement With Refrigerant-Nanoparticles Mixtures', Energy Conversion and Management, 50: 772-776, (2009).
- S.H. Noie, S.Z. Heris, M. Kahani and S.M. Nowee, 'Heat Transfer Enhancement Using Al_2O_3 /Water Nanofluid in a Two-Phase Closed Thermosyphon', International Journal of Heat and Fluid Flow, 30: 700-705, (2009).

Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol ile Kablosuz Sıcaklık Profillerinin Karşılaştırılması

Adnan ALDEMİR^{1*}, Hale HAPOĞLU²

¹Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Van, Türkiye

²Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

(Geliş / Received : 23.10.2015 ; Kabul / Accepted : 26.04.2016)

ÖZ

Bu çalışmada bir proses simülöründe Genelleştirilmiş Öngörmeli Kontrol (GPC) algoritmasının uygulandığı kablosuz sıcaklık kontrol deneyleri gerçekleştirildi ve aynı koşullarda yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar karşılaştırıldı. Temel İşlemler Laboratuvarında bulunan proses simülörü ile Proses Kontrol Laboratuvarında bulunan bilgisayar arasındaki veri aktarımını sağlamak için kablosuz iletişim sistemi kuruldu ve kablosuz deneyler MATLAB/Simulink programı yardımıyla on-line olarak gerçekleştirildi. Deneyler sırasında kablosuz veri transferi 2,4 GHz frekansında radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirildi. GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, herhangi bir N_U (kontrol ufku), N_1 (minimum öngörme ufku) ve N_2 (maksimum öngörme ufku) değerinde, L (kontrol ağırlık faktörü) değerinin 1.0'den büyük tüm değerlerinde ısıtıcının çok büyük salınımlar yaptığı ve buna bağlı olarak sıcaklığında çok büyük salınımlar yaptığı görülmüştür. Bu nedenle GPC kontrol deneyleri, L 'nin 1.0'den küçük değerlerinde gerçekleştirildi. GPC algoritmasındaki N_U , N_2 ve L parametreleri kullanılarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$; $N_2=2.0$; $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$; $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$ değerlerinde $L=0.001$; 0.005 ; 0.01 ; 0.05 ; 0.1 ; 0.5 değerleri için aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda sıcaklık profillerinin zamanla değişimi gözlemlendi. Elde edilen deneysel sonuçlara göre sıcaklık profilleri incelendiğinde genel olarak $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ değerlerindeki deneysel sıcaklıkların $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$; $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$ değerlerine göre set noktasına daha yakın olduğu ve salınımların daha az olduğu görüldü. Ayrıca N_U ve N_2 değerlerinin artırılmasıyla sıcaklıkların set noktasından uzaklaşmaya başladığı ve salınımların arttığı gözlemlenmiştir. $L=0.001$; 0.005 ; 0.01 ; 0.05 ; 0.1 ve 0.5 değerleri ile aynı koşullarda $T_{set}=50^\circ\text{C}$ ve $T_{set}=60^\circ\text{C}$ için yapılan deneyler sonucunda en iyi sıcaklık kontrolünü sağlayan parametreler, hata karelerinin toplamı (ISE) ve hata mutlak değerlerinin toplamı (IAE) değerleri kullanılarak belirlendi. Buna göre yapılan deneylerde en düşük ISE ve IAE değerleri $L=0.01$ değerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca $L=0.01$ 'den daha düşük ve daha yüksek değerlerde hesaplanan ISE ve IAE değerlerinin arttığı ve sıcaklığın set noktasından uzaklaştığı görülmektedir. Sonuç olarak en iyi sıcaklık kontrolü $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $L=0.01$ değerlerinde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: GPC kontrol, MATLAB/Simulink, kablosuz proses kontrol, ISE, IAE

Comparison of Wireless Temperature Profiles With Generalized Predictive Control

ABSTRACT

In this study, Generalized Predictive Control (GPC) algorithm is applied to a process simulator which wireless temperature experiments were achieved and the results of the experiments were compared under the same conditions obtained. To achieve the data transfer between computer in Process Control Laboratory and the process simulator in Unit Operations Laboratory, wireless communication system was established and wireless experiments were performed on-line by means of MATLAB/Simulink program. Wireless data transfers during the experiments were carried out by using radio waves at a frequency of 2.4 GHz. In wireless temperature control experiments which are conducted using with algorithm of GPC, all L (control weighting) values which are bigger than 1.0 are not suitable for temperature control because the heater made very big oscillatory behaviour and consequently temperatures also made very big oscillations at any N_U (control costing horizon), N_1 (minimum costing horizon) and N_2 (maximum costing horizon) values. Therefore GPC experiments were carried out in L values smaller than 1.0. Changes of temperature profiles were observed with time as a result of experiments carried under the same conditions, using the N_U , N_2 ve L parameters in the GPC algorithm to the $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$; $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$; $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$ values for the $L=0.001$; 0.005 ; 0.01 ; 0.05 ; 0.1 and 0.5 values. According to the experimental results analyzing the temperature profiles, the temperatures the $N_1=1.0$ and $N_2=2.0$ values of control was closer to the set point and oscillations were found to be less than according to the values of $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$; $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$; $N_1=1.0$; $N_2=4.0$. Also by increasing the value of N_U and N_2 temperatures are begin to move away from the set point and the oscillations are increased. Wireless experiments conducted under the same conditions for $T_{set}=50^\circ\text{C}$ and $T_{set}=60^\circ\text{C}$ which using the best temperature control parameters with the $L=0.001$; 0.005 ; 0.01 ; 0.05 ; 0.1 and 0.5 values were determined with the integral of the square of the error (ISE) and the integral of the absolute of the error (IAE) values. According to the experiments carried out at the lowest values of ISE and IAE were determined that the value $L = 0.01$. In addition, lower and higher values of $L=0.01$ calculated ISE and IAE values were higher and that can be seen the temperature away from set point. In conclusion, the best temperature control is obtained $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ and $L=0.01$ values.

Keywords: GPC control, MATLAB/Simulink, wireless process control, ISE, IAE

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kimyasal proseslerde istenilen ürün kalitesinin elde edilmesi için gerekli işletim koşullarının sağlanması ve

çalışanlar için güvenli bir çalışma ortamının sağlanması için sıcaklık, basınç, derişim, seviye, akış hızı gibi parametrelerin iyi kontrol edilmesi gerekmektedir. İyi kontrol edilmeyen sistemlerde ekonomik kayıpların yanında çeşitli arızalar da meydana gelebilir. Örneğin bir proseste etkin olmayan sıcaklık kontrolü gereksiz

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: adnanaldemir@yyu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.3 377-388

yakıt tüketimi ve enerji kaybı ile birlikte üretim maliyetinin artmasına veya etkin olmayan basınç kontrolü prosete bulunan makine-ekipmanların zorlanmasına ve dayanımı zayıf sistemlerde ise patlamalara neden olmaktadır. Amaca yönelik, güvenilir ve sürekli bir kontrolün sağlanabilmesi için kontrol parametrelerinin ve kullanılan kontrol yönteminin etkinliği son derece önemlidir.

Literatürde farklı sistemlerle kablosuz iletişim sağlanması ve bazı parametrelerin kablosuz olarak ölçülerek izlenmesi üzerine birtakım çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalara örnek olarak; vakum tanklarındaki veri aktarımı için 90 mm genişliğinde ve 140 mm uzunluğundaki küçük bir sensör düzeneği ile 2.4 GHz frekansında bluetooth sinyalleri kullanılarak bir vakum bölmesinden sıcaklık ve ışık değerlerinin ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bilgisayara on-line veri aktarımı yapılan sistemde termocift ile sıcaklık ve optik sensör ile ışık miktarı voltaj olarak ve pil değeri bilgisayardan takip edilmektedir [1]. Kablosuz sıvı seviye ölçümü için bir sensör sistemi geliştirilmiş ve bu sensör ince bir kapasitör ve indüktör plaka arasına yerleştirilerek bu plakalar arasındaki elektronların geçişi ile oluşan akım ile sensörün ihtiyacı olan güç herhangi bir fiziksel bir akım kaynağı kullanmadan karşılanmaktadır. Hazırlanan bu 22,86 cm boyundaki ve 2 cm kalınlığındaki sensör yardımıyla farklı sıvıların seviye ölçümü gerçekleştirilmiş ve maksimum hata miktarı 1,07 cm olarak belirlenmiştir [2]. Toprağın nem ve sıcaklığının kablosuz ölçümü için MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) geliştirilen bir sensör yardımıyla 2.4 GHz RF ile çalışan bu sensör kullanılarak %0 ile %100 arasında bağıl nem ve -30 ile +100 °C çalışma aralığında ölçümler yapılabilmektedir. Birbirine uzaklığı 8m olan ve 100 mm derinliğinde toprağa gömülmüş iki çubuğa bağlı sensörler 20 m uzaklıktaki veri alıcısına sinyallerini başarılı bir şekilde iletmektedir. Veri alıcısına bağlı 2MB kapasitesinde taşınabilir bellek tarafından veriler kaydedilmektedir [3]. Bir balık çiftliğindeki pH, amonyum ve sıcaklık değerlerinin kablosuz olarak izlenebilmesi için Te sensör ve kablosuz modül olmak üzere iki tür sensör kullanılmıştır. Sensör modülünde pH ve NH₄ sensörleri ile bilgiler toplanarak kablosuz modüle aktarılır. Kablosuz modül radyo frekansı ile verileri merkeze iletir. Bu çalışmadaki amaç sıcaklık, pH ve NH₄ iyonlarını kablosuz olarak görüntülemek ve bunun için kablosuz sensör ağının uygulamasıdır [4]. Kablosuz sensör ağı ile iyon seçici elektrotlar kullanarak içme suyundaki nitrat, amonyum ve klorit iyonlarının analizleri gerçekleştirilmiş ve kablosuz ölçüm sonuçları klasik yöntemlerle karşılaştırıldığında birçok sonucun aynı olduğu aynı olmayan sonuçların da birbirine oldukça yakın olduğu belirlenmiştir [5]. Beton yapısının özellikle ilk evrelerde ve katılma sürecinde hem sıcaklık hemde nem değişimlerinin kablosuz sensör izleme sistemi ile gözlenmesi amaçlanmıştır. Küp şeklindeki beton kalıplarının içinde sıcaklık ve nem değerlerinin aynı anda izlenebileceği iki farklı tür sensör

kullanılmıştır. Verilerin kablosuz olarak gönderilmesine izin veren IEEE 802.15.4 standardına dayalı kablosuz sensör ağı kurulmuştur [6].

GPC yöntemi, proses modeline bağlı olarak proses çıktısının gelecekteki değerlerini tahmin etmek suretiyle yüksek kontrol performansına sahip ileri bir proses kontrol tekniğidir. Proses için tahmin edilen bu değerler ile set değerleri karşılaştırılır ve hata değerleri belirlenir. Hesaplanan hata değerleri formüle edilerek kontrol edici hareketleriyle hata minimize edilir. Literatürde GPC yöntemi ile değişik proseslerde farklı parametrelerin kontrolüne yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. GPC yöntemi ilk olarak Clarke vd. tarafından 1987'de geliştirilmiş ve bu konudaki çalışmalarını iki ayrı yayında toplanmıştır. Bu yayınlarda kontrol yöntemi tasarımı için ARIMAX modelini kullanmışlardır. İlk çalışmada simülasyon sonuçlarıyla GPC'nin PID ve GMV kontrol yöntemlerinden daha üstün olduğunu göstermişlerdir. Bu kontrol yönteminde gelecekteki proses çıkış değişkeni tahmin edilmektedir [7]. Diğer çalışmada prosete bulunan ölü zaman değişimlerinin GPC kontrol algoritması tarafından bertaraf edildiğini göstermişlerdir. Sistem parametrelerinin tespitinde kök yerleştirme, GMV ve PID karşılaştırmaları yapılmıştır. Model parametrelerinin tahmininde yinelemeli en küçük kareler yöntemini uygulamışlardır. Çalışmalarda elde edilen sonuçlara dayanarak endüstriyel proseslerin kontrolü amacıyla GPC yönteminin kullanılmasını önermişlerdir [8]. NaOH ve asetik asit çözeltilerinin sürekli akım borsal reaktörde nötralizasyonu gerçekleştirilmiş ve pH'ın istenilen değerde tutulması için GPC yöntemi kullanılmıştır. GPC algoritması için sistem modeli olarak ARIMAX modeli kullanılmıştır. L'nin göreceli küçük değerleri seçildiğinde, pH değeri kontrol değişkeni olarak set noktasına erişmiş fakat salınımlı davranış sergilemiştir. Uygun L değeri genetik algoritmaları (GA) kullanılarak elde edilmiştir [9]. Stiren polimerizasyonunun gerçekleştiği kesikli çalıştırılan ceketli bir reaktörünün sıcaklık profilinin kontrolünde genelleştirilmiş delta kuralı (GDR) algoritması ile birleştirilen GPC algoritması kullanılmıştır. Monomer dönüşümü, viskozite ortalama molekül ağırlığı ve zincir uzunluğu üzerine değişik optimal koşulların etkileri incelenmiştir. Reaktör sıcaklığı ve reaktöre verilen ısı arasındaki etkileşime dayanan yapay sinir ağı modeli kullanılmıştır. Sonuçlar Self-Tuning PID (STPID) yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Kontrol deneyleri sonucunda GDK-GPC kontrol yönteminin iyi bir performans gösterdiği ve istenilen özelliklerde polimer elde edildiği gözlenmiştir [10]. Dolgulu damıtma kolonu için optimal işletme koşulları ile birlikte sıcaklık kontrolü için PID ve GPC algoritmaları kullanılmış ve ARIMAX tip model parametrelerinin belirlenmesi için kazan ısısına PRBS sinyalleri verilmiştir. GPC algoritmasıyla elde edilen deneysel ve modelden elde edilen verilerin uyumlu olduğu belirlenmiştir. Ayrıca deneysel çalışmalarda GPC performansının PID kontrole göre daha iyi olduğu

anlaşılmıştır [11]. Tam karıştırmalı ceketli bir polimerizasyon reaktörünün sıcaklık kontrolünü set noktası değişimi ile doğrusal olmayan GPC algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiş ve soğutma suyu akış hızına verilen etkiler ile prosesin dinamik davranışı incelenmiştir. Doğrusal olmayan GPC algoritmasında reaktör sıcaklığı ve ısı arasındaki ilişki için NARIMAX tipi model kullanılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan GPC sonuçları karşılaştırılarak doğrusal olmayan GPC algoritmasıyla daha iyi bir performans elde edilmiştir [12].

Literatür örneklerinde görüldüğü gibi kablosuz iletişim tekniği ile farklı sistemlerdeki değişkenlerin ölçümleri yapılarak bu değişkenlerin zamanla değişimleri izlenmiştir. Diğer taraftan GPC yöntemi ile değişik proseslerde farklı parametrelerin kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada bir proses kontrol simülöründe GPC kontrol yöntemini kullanarak kablosuz sıcaklık kontrolünün gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. MATLAB/Simulink programı yardımıyla on-line olarak gerçekleştirilen kablosuz deneyler sırasında veri transferi 2,4 GHz frekansında radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Aynı koşullarda gerçekleştirilen kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde kullanılan parametrelerin etkinliği ve sıcaklık kontrolündeki performansları sıcaklık profilleri incelenerek ve hesaplanan ISE ve IAE değerleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Ayrıca GPC yönteminin kullanıldığı bir sistemde sabit set noktasındaki kablosuz sıcaklık profillerinin karşılaştırılması deneysel olarak ilk defa uygulanmıştır. Bu bakımdan yapılan çalışma kablosuz proses kontrol için yeni ve iyi bir örnek olmakla birlikte bu alanda literatüre önemli bir katkı sağlayacağı kesindir.

2. DENEY SİSTEMİ (EXPERIMENTAL SYSTEM)

Kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinin gerçekleştirilmesinde Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Temel İşlemler laboratuvarında bulunan Cussons P3005 proses kontrol simülörü kullanılmıştır. Bu simülör sıcaklık, akış hızı, sıvı seviye ve basınç olmak üzere dört farklı proses parametresinin ölçüm ve kontrolü yapılabilen bir sistemdir. Proses simülöründe iki ana bölüm vardır. Bunlar proses ekipmanlarının bulunduğu bölüm ve elektronik devrelerin bulunduğu, ölçüm ve kontrolün yapılabildiği kumanda panosudur [13]. Proses kontrol simülöründe sisteme beslenen suyun muhafaza edildiği bir adet tank, sistemde suyun sirkülasyonunu sağlayan elektrik ile çalışan bir adet pompa, şebeke suyu ile soğutmanın yapıldığı ceketli soğutucu, sistemde suyun tutulduğu iki adet cam tank, elektrik ile çalışan bir adet akış hızı kontrol vanası, bir adet sıvı seviye kontrol vanası, akış hızını ölçen bir adet orifismetre, diferansiyel basınç farkını sıvı seviyesine çeviren bir adet transmitter, sıvının taşmasını önlemek amacıyla pompanın otomatik olarak kapanmasını sağlayan sigorta, pnömatik basınç kontrol edici indikatörü,

pnömatik basınç kaydedici, pnömatik olarak çalışan basınç kontrol vanası, sisteme kompresörden gelen basınçlı havayı istenilen basınç değerindeki havayı ileten iki adet regülatör bulunmaktadır. Ayrıca sistemde dört farklı deney düzeneğini oluşturabilmek için elle ayarlanan vanalar bulunmaktadır. Proses kontrol simülörünün diğer bir birimi ise elektronik devrelerin bulunduğu kontrol panosudur.

Bu panoda sıcaklık, sıvı seviye kontrol ve akış hızının ölçüm ve kontrolü yapılabilmektedir. Burada üç adet gösterge, otomatik-manual kontrole geçiş yapılabilen butonlar, pompa ve ısıtıcıyı çalıştırmak için butonlar bulunmaktadır. Simülörde sıcaklık, akış hızı ve sıvı seviyesi ölçüm ve kontrol sistemi tamamen elektriksel olarak basınç sistemi ise pnömatik olarak çalışmaktadır (Şekil 1)



Şekil 1. Kablosuz ölçüm ve kontrol için geliştirilen proses kontrol simülörü (Developed process control simulator for wireless measurement and control)

Kablosuz deneylerin gerçekleştirilmesinde Temel İşlemler laboratuvarında bulunan proses kontrol simülörü ile Proses Kontrol laboratuvarında bulunan bilgisayar arasında veri aktarımını sağlamak için kablosuz iletişim sistemi kurulmuştur. Bunun için proses kontrol simülöründe kablosuz ölçüm ve kontrol deneyleri gerçekleştirmek için bazı değişiklikler yapılarak, yeni ekipmanlar eklenmiştir. Bu amaçla bilgisayar ve sistem arasında iletişimi sağlayabilmek için simülör ve laboratuvardaki bilgisayar arasında veri

aktarımını sağlayan iki adet anten koyulmuştur. Ayrıca proseste ayarlanabilen değişkenler olarak belirlenen; ısıtıcı, sıvı seviye kontrol vanası, basınç kontrol vanası tekrardan kalibre edilmiş ve bunların çıkışları modüllere bağlanmıştır. Bu modüller iki anten arasındaki aktarılan verileri bünyesinde bulundurmaktadır. Deneyler sırasında kablosuz veri transferi 2,4 GHz frekansında radyo dalgaları kullanılarak gerçekleştirilmiştir [13].

3. DENEY YÖNTEMİ (EXPERIMENTAL METHOD)

Proses kontrol simülöründe sıcaklık kontrol deneyleri için elle ayarlanan vanaların pozisyonları açık veya kapalı şeklinde uygun konumda ayarlanır. Akış hızı kontrol vanası 2.5 l/dk ve sıvı seviye kontrol vanası % 45 vana açıklığı değerinde ayarlanarak ikinci tanktaki sıvı seviyesinin yaklaşık aynı değerinde sabitlenmesi sağlanır. Kontrol panosu üzerindeki ısıtıcı düğmesi ile çalıştırılan ısıtıcı ile sistemdeki suyun sıcaklığı artırılır. Sistemde sıcaklığı artan suyun soğutulması tanka dönmeye önce ceketli soğutucudan şebeke suyu ile sağlanır.

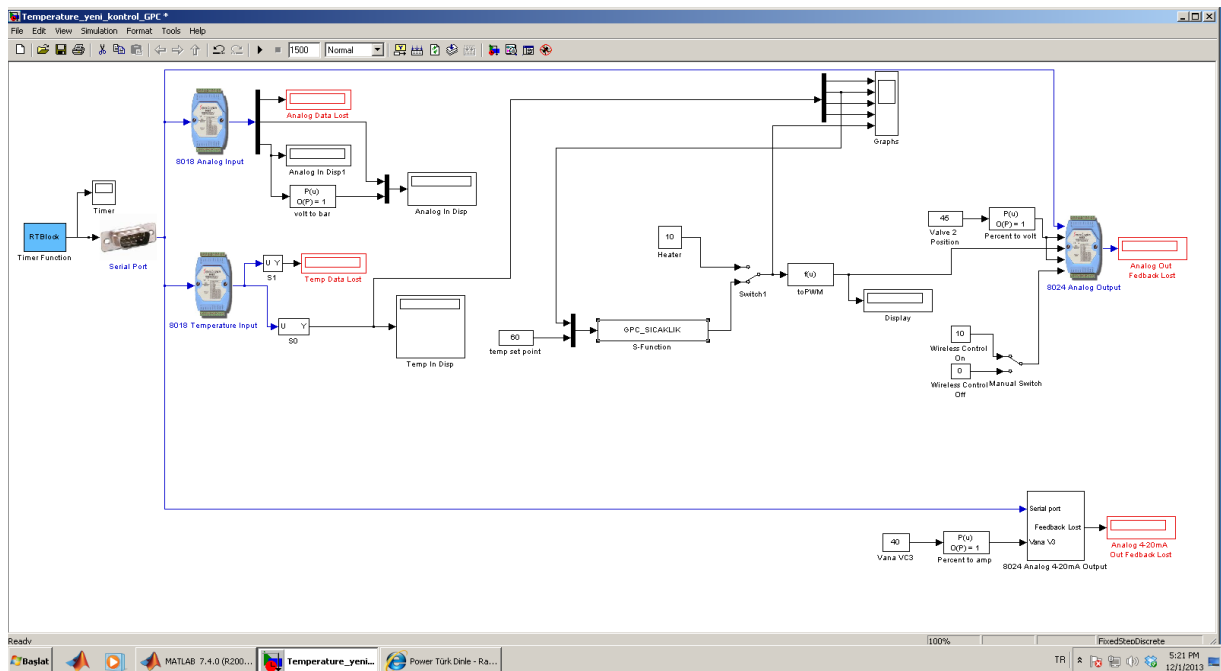
GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, algoritmadaki N_U , N_1 , N_2 ve L parametreleri kullanılarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$; $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$; $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$ değerlerindeki $L=0.001$, 0.005 , 0.01 , 0.05 , 0.1 , 0.5 değerleri için aynı koşullarda farklı set noktaları seçilerek deneyler yapılmıştır. Bu kontrol deneylerinde ısıtıcı ve sıcaklık profillerinin zamanla değişimi gözlenmiştir. En iyi sıcaklık kontrolünü sağlayan parametrelerin belirlenmesinde deney verileri kullanılarak hesaplanan ISE ve IAE değerleri kullanılmıştır. Sıcaklık kontrol deneylerinde başlangıçta ısıtıcı sabit %10 ısıtıcı açıklığı değerinde 300 saniye çalıştırılarak sistemin yatışkın hale gelmesi

beklenmiştir. 300 saniye sonunda MATLAB/Simulink blok diyagramında bulunan kontrol anahtarı değiştirilerek daha önce kaydedilen kontrol algoritması devreye alınmış ve bu algoritmadaki parametrelerin kontrol üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde kullanılan MATLAB/Simulink programının şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir. Burada sistemin kablosuz kontrolünün yapılabilmesi için bir adet wireless açık-kapalı düğmesi, proses parametrelerinin sayısal ve grafiksel olarak gösterildiği bloklar, hata sinyallerinin depolandığı bloklar, simülördeki elektriksel vanaların açıklık değerlerinin ayarlandığı kutucuklar bulunmaktadır (Şekil 2).

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde yapılan ön denemelerde, algoritmada kullanılan herhangi bir N_U , N_1 ve N_2 değerinde, L 'nin 1,0'den büyük tüm değerlerinde ısıtıcının % 0-100 arasında salınımlar yaptığı ve buna bağlı olarak sıcaklığında çok büyük salınımlar yaptığı görülmüştür (Şekil 3-4). GPC algoritmasında en etkili ayar parametresi olan L 'nin 1.0'den büyük değerlerinde, sistemin tepkisi azaldığından dolayı GPC deneyleri, L 'nin 1.0'den küçük değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

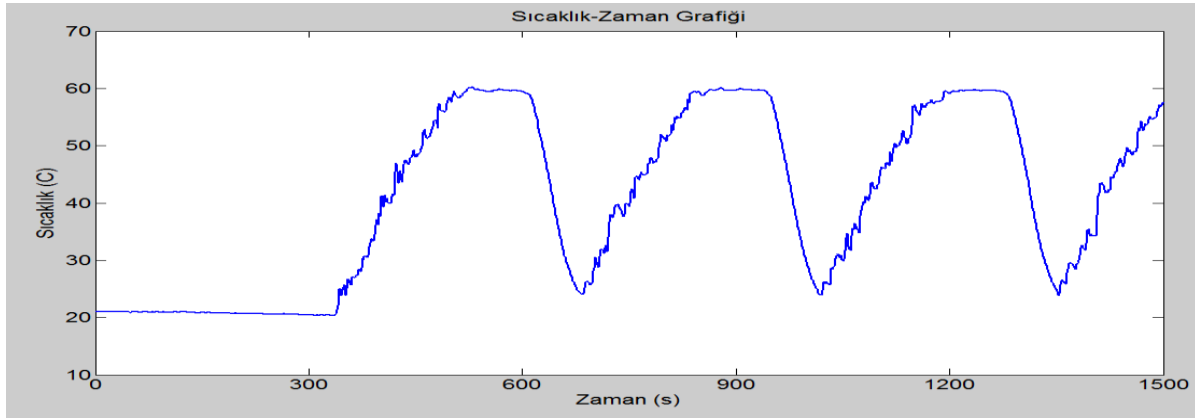
GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde yapılan ön denemelerde, algoritmadaki herhangi bir N_U , N_1 ve N_2 değerinde, L 'nin 1.0'den büyük tüm değerlerinde ısıtıcının çok büyük salınımlar yaptığı ve buna bağlı olarak sıcaklığında çok büyük salınımlar yaptığı görülmüştür. Bu nedenle GPC kontrol deneyleri, L 'nin 1.0'den küçük değerlerinde gerçekleştirilmiştir.



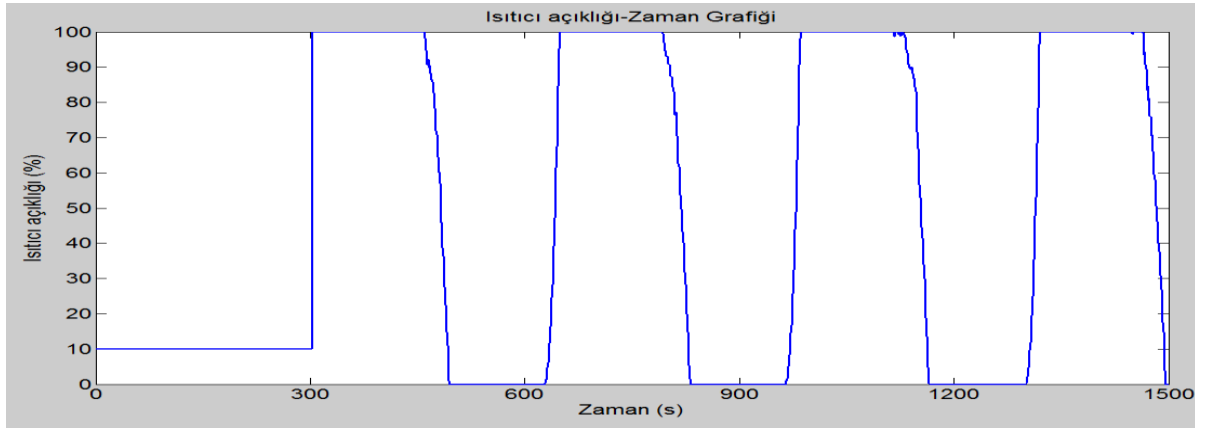
Şekil 2. Kablosuz sıcaklık GPC deneyinin MATLAB/Simulink blok diyagramı (MATLAB/Simulink block diagram of wireless temperature GPC experiment)

GPC kontrol algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, $T_{set}=50$ °C için algoritmadaki N_U , N_2 ve L parametreleri kullanılarak

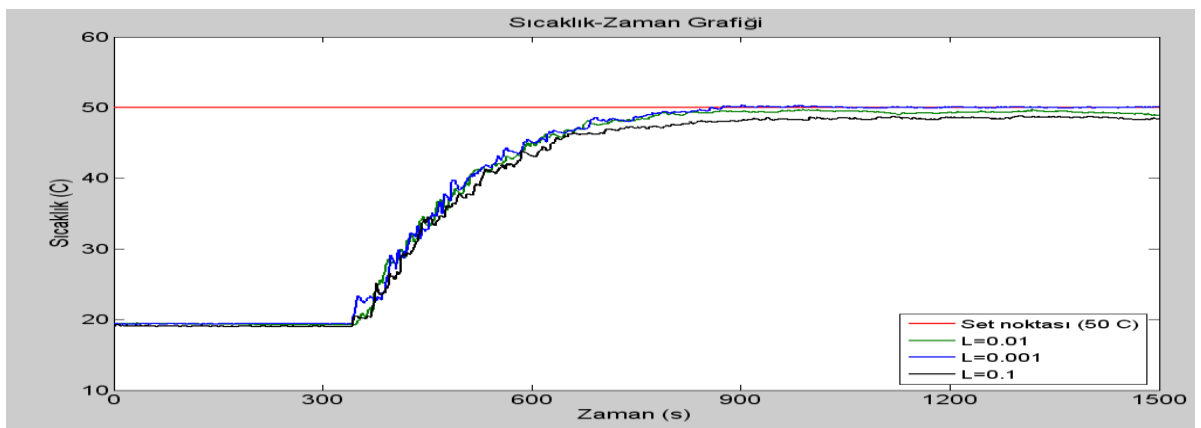
$L=0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5$ değerlerinde yapılan deneylerde sıcaklığın zamanla değişim grafiği Şekil 5-12'de verilmiştir. Bu deneylerde elde edilen veriler



Şekil 3. L 'nin 1.0'den büyük değerleri için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for L values are bigger than 1.0)



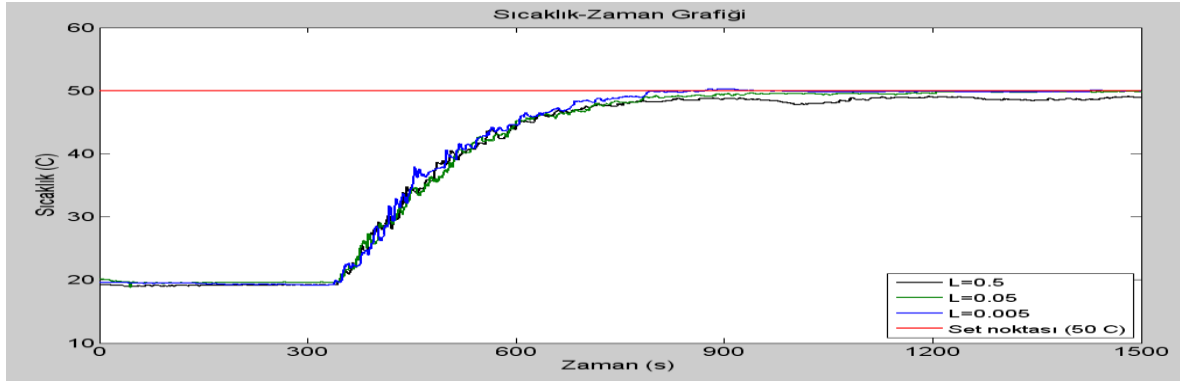
Şekil 4. L 'nin 1.0'den büyük değerleri için ısıtıcı açıklığının zamanla değişim grafiği (Heater capacity changes for L values are bigger than 1.0)



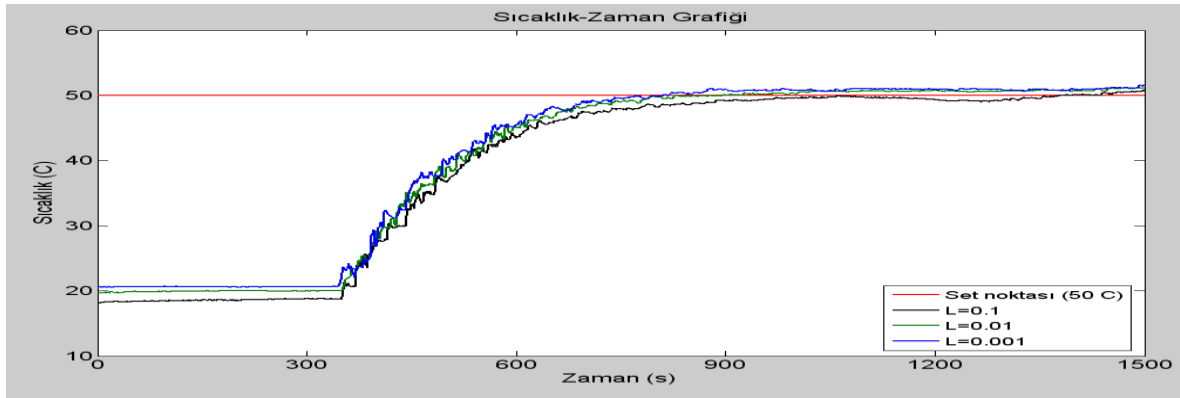
Şekil 5. $N_U=1, N_1=1, N_2=2$ ve $L=0.001, 0.01, 0.1$ için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1, N_1=1, N_2=2$ and $L=0.001, 0.01, 0.1$)

$N_U=1.0, N_1=1.0, N_2=2.0, N_U=1.0, N_1=1.0, N_2=4.0, N_U=2.0, N_1=1.0, N_2=2.0$ ve $N_U=2.0, N_1=1.0, N_2=4.0$ değerlerindeki

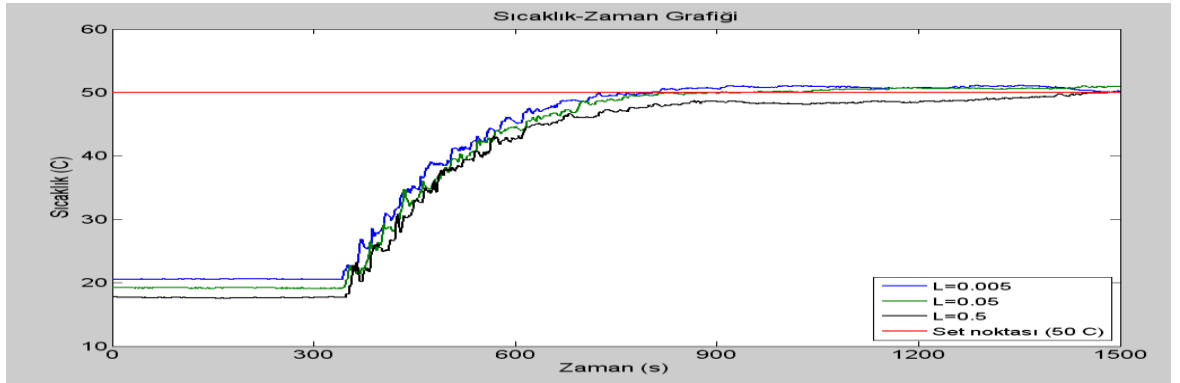
kullanılarak hesaplanan ISE değerleri Tablo 1'de ve IAE değerleri Tablo 2'de verilmiştir.



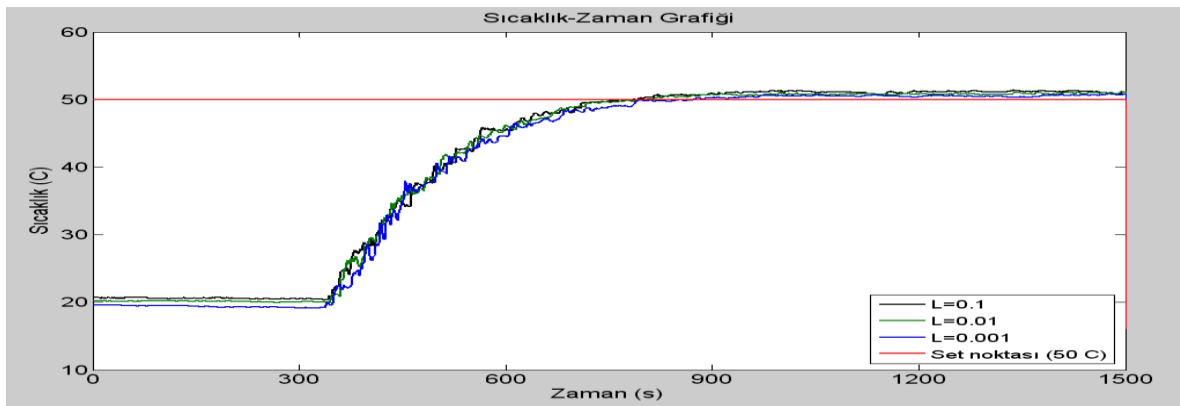
Şekil 6. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)



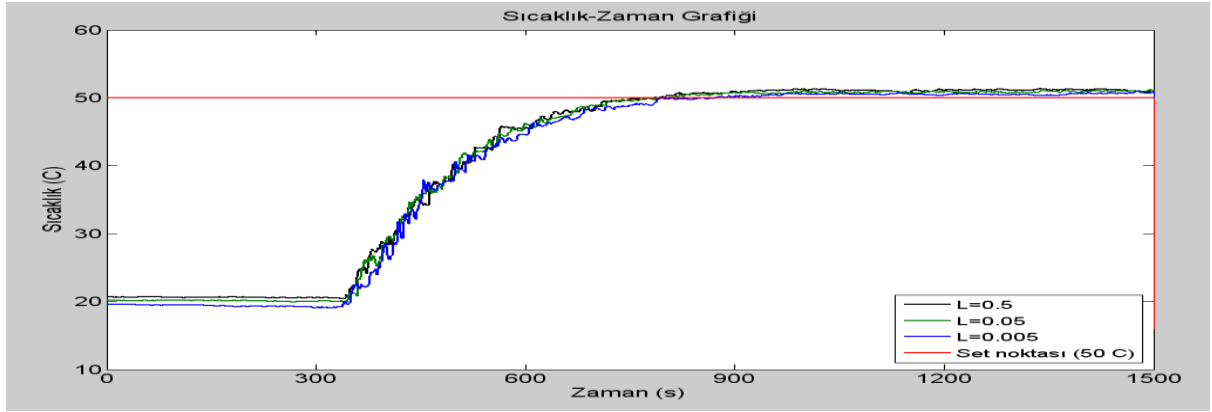
Şekil 7. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



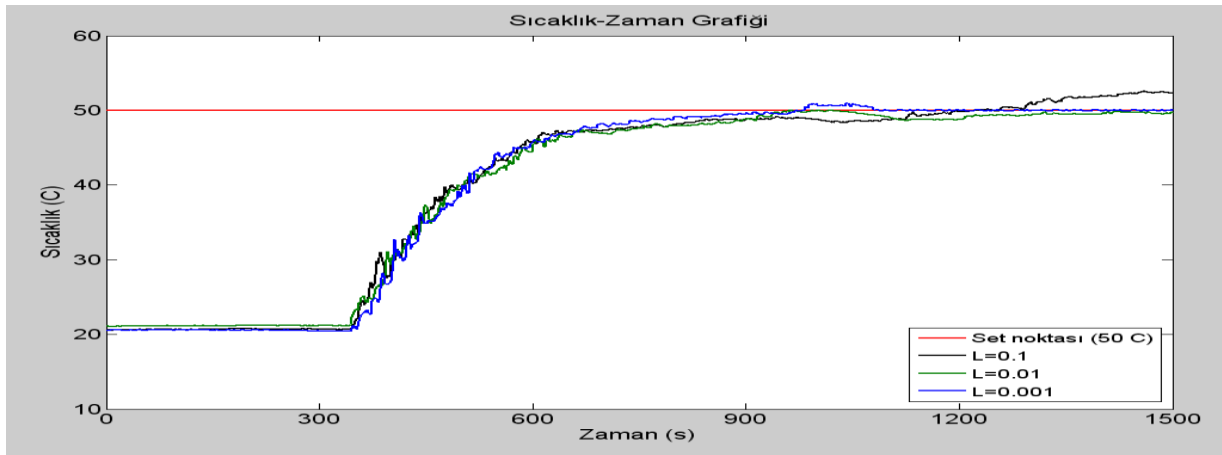
Şekil 8. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)



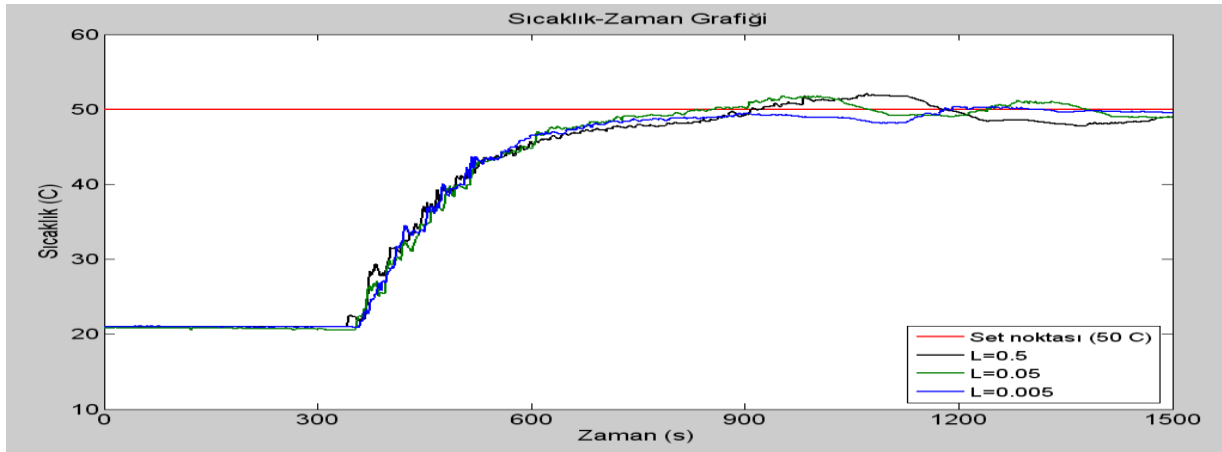
Şekil 9. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



Şekil 10. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.005, 0.05, 0.5$ için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.005, 0.05, 0.5$)



Şekil 11. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.001, 0.01, 0.1$ için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.001, 0.01, 0.1$)



Şekil 12. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.005, 0.05, 0.5$ için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.005, 0.05, 0.5$)

Çizelge 1. Tset=50 °C için hesaplanan ISE değerleri (Calculated ISE values for Tset=50 °C)

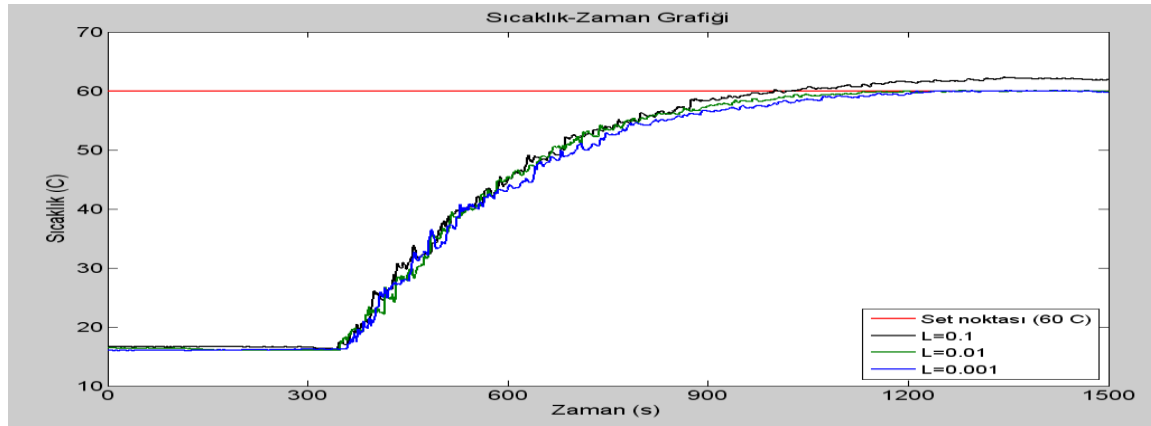
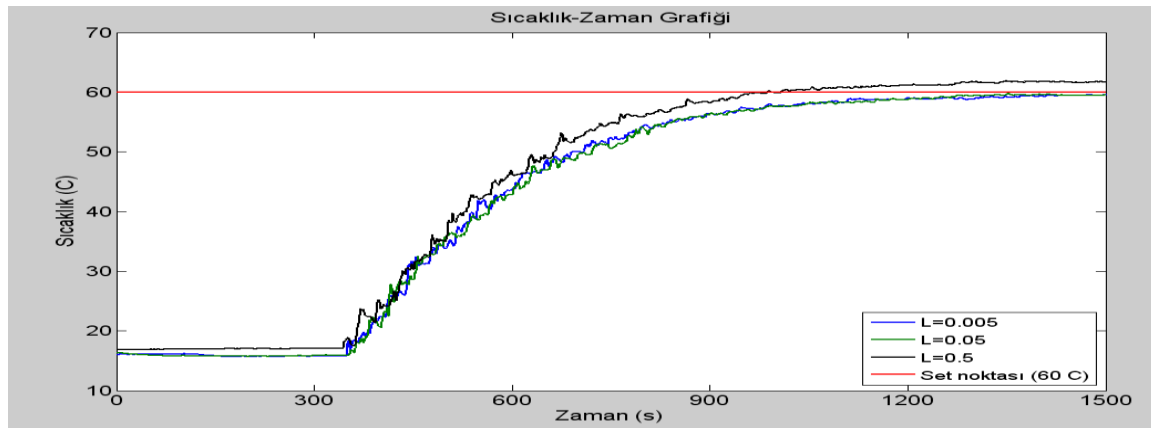
	L=0,001	L=0,005	L=0,01	L=0,05	L=0,1	L=0,5
Nu=1, N ₂ =2	60534,77	61563,10	59008,28	59981,36	62488,23	63248,61
Nu=1, N ₂ =4	63143,64	63437,35	61657,55	62182,98	63793,99	70883,09
Nu=2, N ₂ =2	66114,53	71016,31	63999,01	64935,69	72290,16	74135,42
Nu=2, N ₂ =4	70872,40	75781,33	64562,83	69668,41	78849,61	79998,53

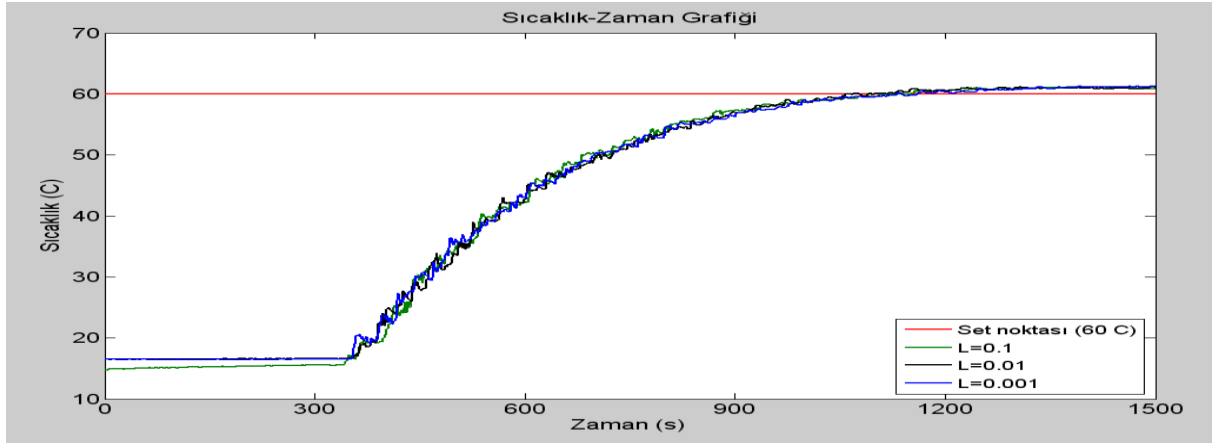
Çizelge 2. Tset=50 °C için hesaplanan IAE değerleri (Calculated IAE values Tset=50 °C)

	L =0,001	L =0,005	L =0,01	L =0,05	L =0,1	L =0,5
Nu=1, N ₂ =2	4224,90	4425,10	4088,30	4355,10	4742,80	4498,70
Nu=1, N ₂ =4	4415,00	4896,50	4232,40	4436,70	4602,50	5067,50
Nu=2, N ₂ =2	4505,70	4706,50	4310,00	4491,50	4827,40	4840,80
Nu=2, N ₂ =4	4856,50	4881,80	4540,90	4600,40	5315,10	5881,10

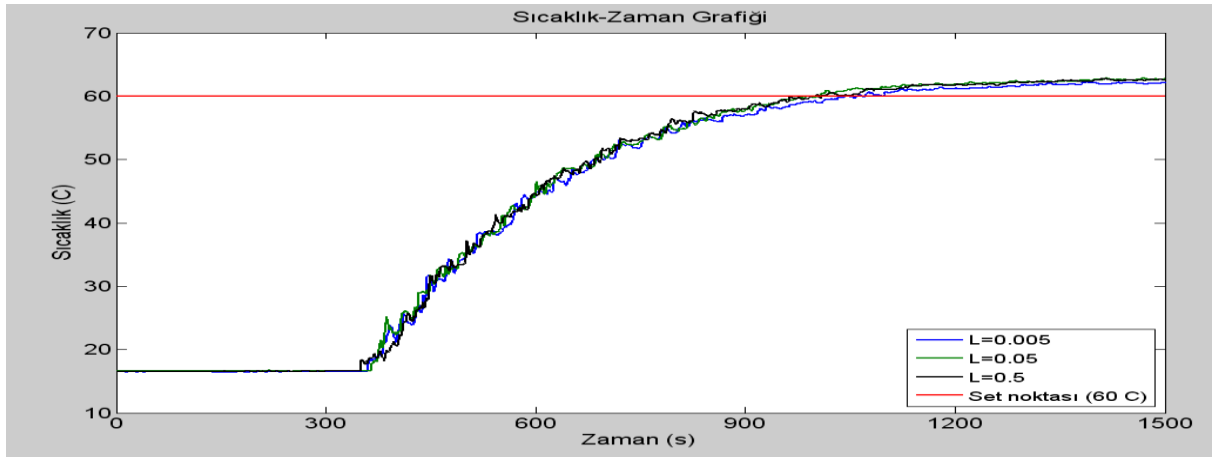
GPC kontrol algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, Tset=60 °C için algoritmadaki N_U, N₂ ve L parametreleri kullanılarak N_U=1.0 N₁=1.0 N₂=2.0, N_U=1.0 N₁=1.0 N₂=4.0, N_U=2.0 N₁=1.0 N₂=2.0 ve N_U=2.0 N₁=1.0 N₂=4.0 değerlerindeki

L=0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1, 0.5 değerlerinde yapılan deneylerde sıcaklığın zamanla değişim grafiği Şekil 13–20’de verilmiştir. Bu deneylerde elde edilen veriler kullanılarak hesaplanan ISE değerleri Tablo 3’de ve IAE değerleri Tablo 4’de verilmiştir.

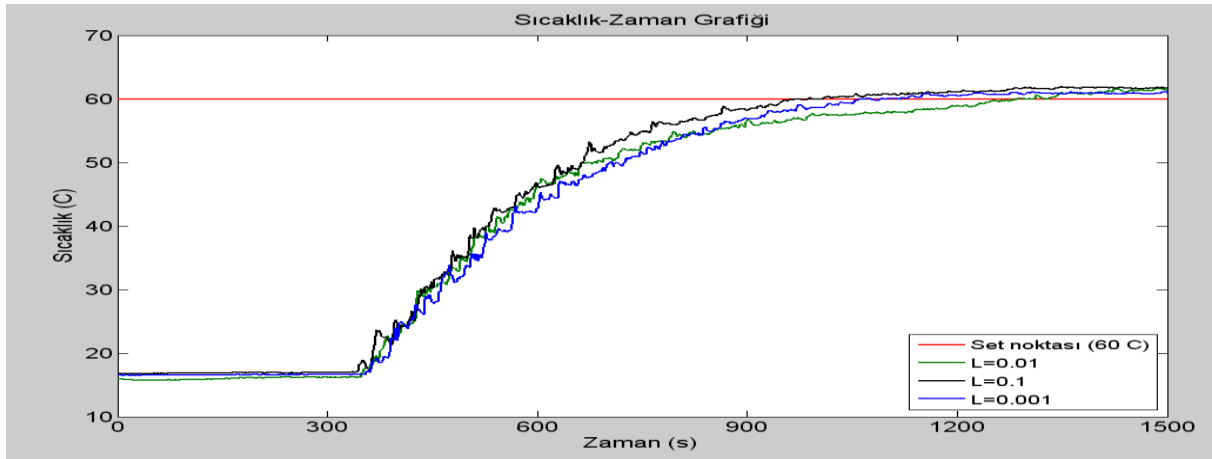
Şekil 13. N_U=1, N₁=1, N₂=2 ve L=0.001, 0.01, 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for N_U=1, N₁=1, N₂=2 and L=0.001, 0.01, 0.1)Şekil 14. N_U=1, N₁=1, N₂=2 ve L=0.005, 0.05, 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for N_U=1, N₁=1, N₂=2 and L=0.005, 0.05, 0.5)



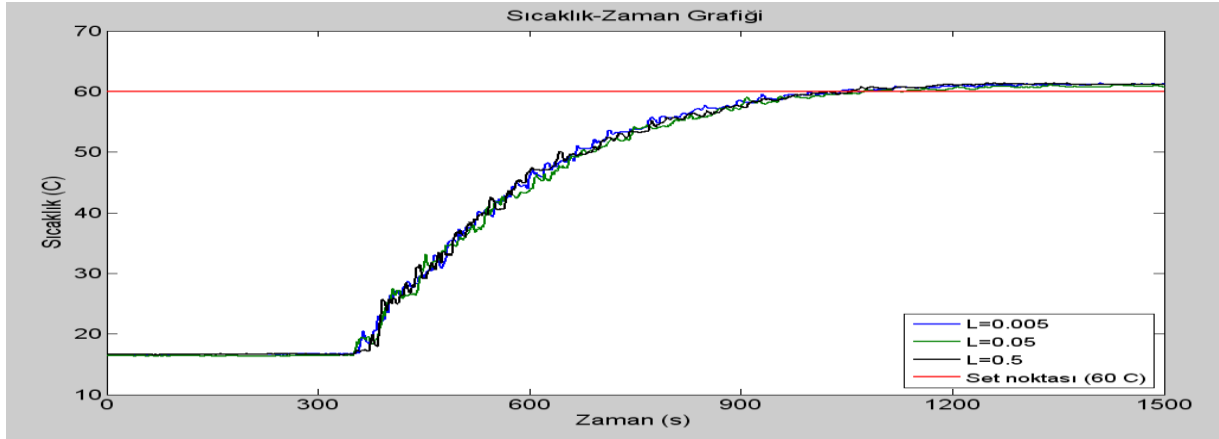
Şekil 15. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



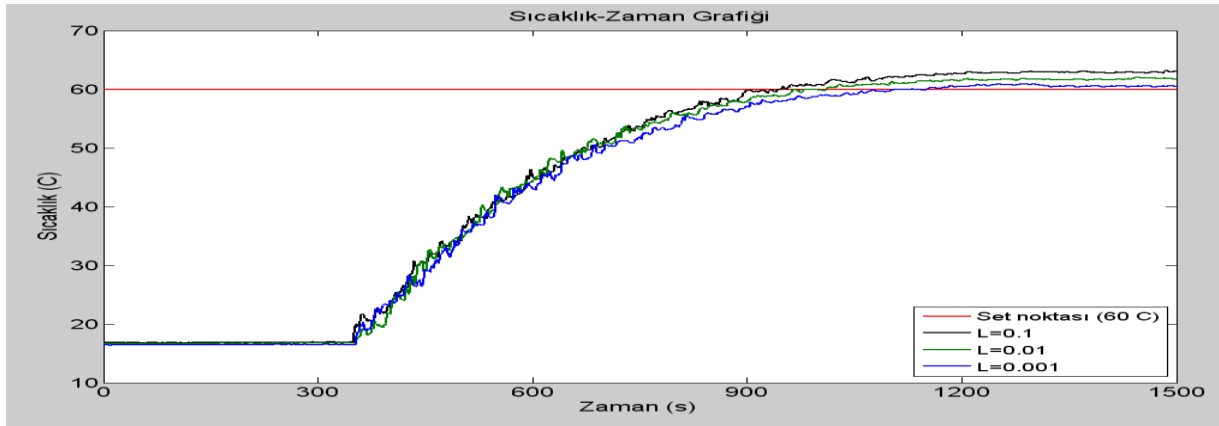
Şekil 16. $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=1$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)



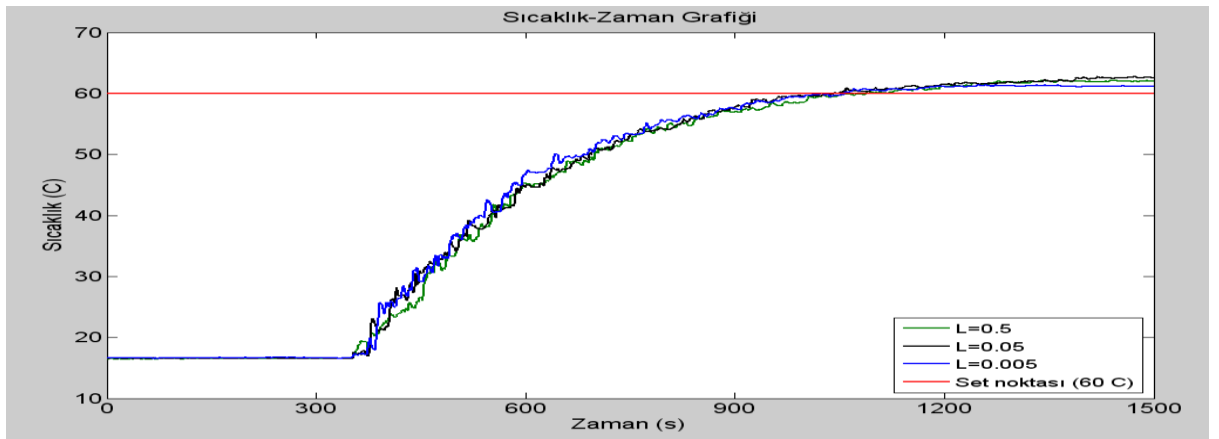
Şekil 17. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



Şekil 18. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=2$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)



Şekil 19. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.001$, 0.01 , 0.1 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.001$, 0.01 , 0.1)



Şekil 20. $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ ve $L=0.005$, 0.05 , 0.5 için sıcaklığın zamanla değişim grafiği (Temperature changes for $N_U=2$, $N_1=1$, $N_2=4$ and $L=0.005$, 0.05 , 0.5)

Çizelge 3. Tset=60 °C için hesaplanan ISE değerleri (Calculated ISE values for Tset=60 °C)

	L=0.001	L=0.005	L=0.01	L=0.05	L=0.1	L=0.5
Nu=1, N2=2	230608.73	238978.45	216372.58	229068.34	251189.20	255201.85
Nu=1, N2=4	246643.91	245438.40	224396.82	226978.68	231434.14	251434.14
Nu=2, N2=2	247277.42	248254.42	241464.77	236526.64	248487.98	252190.04
Nu=2, N2=4	250241.19	257593.07	239987.66	243916.83	257283.73	258254.42

Çizelge 4. Tset=60 °C için hesaplanan IAE değerleri (Calculated IAE values for Tset=60 °C)

	L=0.001	L=0.005	L=0.01	L=0.05	L=0.1	L=0.5
Nu=1, N2=2	10026.00	10178.50	9285.60	9585.60	10295.00	10758.30
Nu=1, N2=4	10197.50	10318.20	9473.00	9632.90	10417.70	10544.00
Nu=2, N2=2	10178.50	10278.40	9697.20	9755.60	10471.40	10544.00
Nu=2, N2=4	10300.70	10423.40	9897.20	9919.20	10398.50	10646.70

5. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

Bu çalışmada GPC algoritmasının uygulandığı kablosuz sıcaklık kontrol deneyleri gerçekleştirilmiş ve aynı koşullarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. GPC algoritmasının kullanıldığı kablosuz sıcaklık kontrol deneylerinde, algoritmadaki N_U , N_1 , N_2 ve L parametreleri kullanılarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$, $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$, $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$ değerlerindeki $L=0.001$, 0.005 , 0.01 , 0.05 , 0.1 , 0.5 değerleri için aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda ısıtıcı ve sıcaklık profillerinin zamanla değişimi gözlenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlarda, sıcaklık profilleri incelendiğinde genel olarak $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ değerlerindeki deneysel sıcaklıkların $N_U=1.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$, $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=2.0$ ve $N_U=2.0$ $N_1=1.0$ $N_2=4.0$ değerlerine göre set noktasına daha yakın olduğu ve salınımın daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca N_U ve N_2 değerlerinin artırılmasıyla sıcaklıkların set noktasından uzaklaşmaya başladığı ve salınımların arttığı gözlenmiştir. $L=0.001$, 0.005 , 0.01 , 0.05 , 0.1 , 0.5 değerleri kullanılarak $T_{set}=50$ °C ve $T_{set}=60$ °C için aynı koşullarda yapılan deneyler sonucunda en iyi sıcaklık kontrolünü sağlayan parametre değerleri ISE ve IAE değerleri kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar kullanılarak hesaplanan ISE değerlerinin verildiği Tablo 1, Tablo 3 ve IAE değerlerinin verildiği Tablo 2, Tablo 4 incelendiğinde en düşük ISE ve IAE değerleri $L=0.01$ değerinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu çizelgelerde $L=0.01$ 'den düşük ve yüksek değerlerde ISE ve IAE değerlerinin arttığı ve sıcaklığın set noktasından uzaklaştığı görülmektedir. Sonuç olarak en iyi sıcaklık kontrolü $N_U=1.0$; $N_1=1.0$; $N_2=2.0$ ve $L=0.01$ değerlerinde elde edilmiştir.

SEMBOLLER (NOTATIONS)

N_U	Kontrol ufku
N_1	Minimum öngörme ufku
N_2	Maksimum öngörme ufku
L	Kontrol Ağırlık Faktörü

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

ARIMAX	Auto Regressive Integral Moving Average eXogenous
GA	Genetik Algoritma
GMV	Generalized Minimum Variance Control
GPC	Generalized Predictive Control
IAE	Integral of the Absolute value of the Error
ISE	Integral of the Square value of the Error
MPC	Model Predictive Control
PID	Proportional Integral Derivative Control
RF	Radio Frequency

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı (AÜ BAPRO) 10A4343001 nolu proje ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Murari, A. ve Lotto, L., Wireless Communication Using Detectors Located Inside Vacuum Chambers, *Vacuum*, 72(2): 149–155, (2004).
2. Woodard, S.E. ve Taylor, B.D., A Wireless Fluid-Level Measurement Technique, *Sensors and Actuators*, 137(2): 268–278, (2007).
3. Jackson, T., Mansfield, K., Saafi, M., Colman, T. ve Romine, P., Measuring Soil Temperature and Moisture Using Wireless MEMS Sensors, *Measurement*, 41(4): 381–390, (2008).

4. López, M., Martínez, S., Gómez, J. M., Herms, A., Tort, L., Bausells, J. ve Errachid, A., Wireless Monitoring of the pH, NH_4^+ and Temperature in a Fish Farm, *Procedia Chemistry*, 1(1): 445–448, (2009).
5. Capella, J. V., Bonastre, A., Ors, R. ve Peris, M., A Wireless Sensor Network Approach for Distributed In-Line Chemical Analysis of Water, *Talanta*, 80(5): 1789–1798, (2010).
6. Barroca, N., Borges, L. M., Velez, F. J., Monteiro, F., Górski, M., Gomes, J. C., Wireless Sensor Networks for Temperature and Humidity Monitoring Within Concrete Structures, *Construction and Building Materials*, 40(1): 1156–1166, (2013).
7. Clarke, D.M., Mohtadi, C. and Tuffs, P.S., Generalized Predictive Control, Part I. The Basic Algorithm, *Automatica*, 23(2): 137-148, (1987).
8. Clarke, D.M., Mohtadi, C. and Tuffs, P.S., Generalized Predictive Control, Part II. Extensions and Interpretations, *Automatica*, 23(2): 149-160, (1987).
9. Altınten, A., Generalized Predictive Control Applied to A pH Neutralization Process, *Computers and Chemical Engineering*, 31(10): 1199-1204, (2007).
10. Çetinkaya, S., Durmazucar, H. H., Zeybek, Z., Hapoğlu, H., Alpbaz, M., Kesikli Bir Polimerizasyon Reaktörüne Farklı Optimal Şartlarda Sıcaklık Kontrolünün Uygulanması, *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 28(2): 383-392, (2013).
11. Karacan, S., Hapoğlu, H., Alpbaz, M., Application of Optimal Adaptive Generalized Predictive Control to A Packed Distillation Column, *Chemical Engineering Journal*, 84(3): 389-396, (2001).
12. Özkan, G., Hapoğlu, H., Alpbaz, M., Non-Linear Generalized Predictive Control of A Jacketed Well Mixed Tank As Applied to A Batch Process—A Polymerisation Reaction, *Applied Thermal Engineering*, 26(7): 720–726, (2006).
13. Aldemir, A., Hapoğlu, H., Kablosuz Sıcaklık Kontrolü İçin PID Ayarlama Yöntemlerinin Karşılaştırılması, *Journal of Polytechnic*, 19(1): 9-19, (2016).