

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

	Sayfa No
Levent AYDIN, Serdar KÜÇÜK Üç Boyutlu Yazıcı ve Tarayıcı ile Hastaya Özel Medikal Ortez Tasarımı ve Geliştirilmesi Design and Construction of Ankle Foot Orthosis By Means Of Three Dimensional Printers	1-8
Tolga AKIŞ On the Yielding of Two-Layer Composite Spherical Pressure Vessels	9-16
Amr ÖZDEMİR, Emre ERCAN Mantolama Yöntemiyle Güçlendirilmiş Betonarme Kolonların Akustik Emisyon Yöntemiyle Analizi Acoustic Emission Analysis Method of Reinforced Concrete Column with the Jacketing Methods	17-23
Meral DÜKKANCI A Parametric Study on the Heterogeneous Photo-Fenton-Like Oxidation of Bisphenol-A over an Fe/TiO ₂ Catalyst under Visible Light Bisfenol-A'nın Görünür Bölge Işığında ve Fe/TiO ₂ Katalizörü Üzerinde Heterojen Foto-Fenton-Tipi Oksidasyonu Üzerine Parametrik Çalışma	25-36
Mehmet YUMURTACI, İsmail YABANOVA Yapay Sinir Ağları ile Dinamik Ağırlık Tahmin Uygulaması Dynamic Weight Estimation Application with Artificial Neural Networks	37-41
Nursel Altın ÖZBEK, Adem ÇİÇEK, Mahmut GÜLEŞİN, Onur ÖZBEK AIISI 304 ve AIISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi Evaluation of Machinability of AIISI 304 and AIISI 316 Austenitic Stainless Steels	43-49
Abdulmecit GÜLDAŞ, Servet TEMEL, Mehmet ALTUĞ Alüminyum Tozu Katkılı Polipropilenin Ergiyik Akış İndeksi Özelliklerinin İncelenmesi Investigation of Melt Flow Index Properties of Polypropylene Reinforced Aluminum Powder	51-59
Ramazan BAYINDIR, Seyfettin VADİ A Web-Based Educational Tool For Simulation of Reactive Power Compensation With Synchronous Motor	61-69
Murat ÖTKÜR, Orhan ATABAY, İsmail Murat EREKE Model Based Predictive Engine Torque Control for Improved Drivability	71-82
Yakup KIRÇIÇEK, Ahmet AKTAŞ, Şule ÖZDEMİR Yenilenebilir Enerji Desteği için Kullanılan Farklı Tip Bataryaların Modellenmesi ve Karşılaştırılması Analizi Modelling and Comparative Analysis of Different Type of Batteries Used for Renewable Energy Support	83-90
İlker Bekir TOPÇU, Onur Enes DEMİREL, Tayfun UYGUNOĞLU Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Mortars	91-96
Nihat PAMUK Determination of Protection and Relay Coordination Strategy in Electrical Power Systems Based on Renewable Energy Generation Resource Using Petri Net Method Petri Ağı Yöntemi Kullanılarak Yenilenebilir Enerji Üretim Kaynaklı Elektriksel Güç Sistemlerinde Koruma ve Röle Koordinasyon Stratejisinin Belirlenmesi	97-110
Aydin SALIMIASL, Mohammad RAFIGHI Tireşim ve Kesme Kuvveti Etkili Takım Aşınmasının Bulank Mantıkla İncelenmesi ve Tahmini Monitoring and Estimating of Vibration and Cutting Force Based Tool Wear via Fuzzy Logic	111-120
Semih AĞCA, Neşet AKAR Santrifüj Döküm Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemelerde Üretim Parametrelerinin Malzemenin Sertliği Üzerine Etkisi Effect of Fabrication Parameters on Hardness of Al-Cu Functionally Graded Materials Manufactured by Centrifugal Casting	121-127
Bourayou Euehi, N. Mentai A-H, Gouaoura A Modeling OF Liquid-Liquid Equilibrium Data and Estimation of New Binary Interaction Parameters for NRTL Model for the Quaternary System Water/ Ethanol/1-Butanol/KCl at 298.15K	129-135
Serkan YILDIZ, Mustafa YILMAZ Türk İnşaat Sektöründe Çalışanların Güvenlik Kültürü Düzeyinin ve Güvenlik Performansı ile İlişkisinin İncelenmesi Investigation of Safety Culture Level Among Turkish Construction Sector Employees and its Relation with Safety Performance	137-149
Sabri UZUNER, Nihat AKKUS, Metin TOZ 5 Eksenli Manipülatörün Eklemler Uzağında Yörünge Planlaması Trajectory Planning of a 5-DOF Serial Robot Manipulator in Joint-Space	151-157
Hamit SARUHAN, Menderes KAM, Fuat KARA Dynamic Behavior Analysis of Rotor Supported by Damped Rolling Element Bearing Housing Sönümlü Yuvarlanmalı Yataklı Desteklenen Milin Dinamik Davranış Analizi	159-164
Murat YILDIRIM Determination of Contact Parameters of Au/n-Ge Schottky Barrier Diode with Rubrene Interlayer	165-173
Recep Sinan ARSLAN, İbrahim Alper DOĞRU, Necaattin BARIŞCI Android Mobil Uygulamalar için İzin Karşılaştırma Tabanlı Köreticili Yazılım Tespiti Permission Comparison Based Malware Detection System for Android Mobile Applications	175-189
Kürşad GÖV Influence of Coolant on the Performance of Electro Discharge Hole Drilling Soğutma Sıvısının Elektriksel Erozyon Delik Delme Performansı Üzerine Etkileri	191-196
Ahmet ÖNEN Loss Calculation Technique With Randomize Load Curves Rastgele Yük Eğrisi Metodu ile Elektrik Kayıplarının Hesaplanması	197-203
Hasan SAHİN Adaptif Hız Kontrol (AHK) Sistemindeki Mesafe Kontrol Sisteminin Sabit Mesafe Ve Sabit Zaman Yöntemleriyle Uygulamalı Olarak Karşılaştırılması Comparison of A Distance Control Design Via Constant Distance And Constant Time Gap (CTG) Methods In An Adaptive Cruise Control (ACC) System	205-210
Ali İbrahim ATILGAN, Lika TÜRKMEN Farklı Akiskanlarda Değişken Soğutucu Akışkan Debili Sistemin (VRF) Enerji ve Ekserji Analizlerinin Karşılaştırılması Comparison of Energy and Exergy Analysis for Variable Refrigerant Flow System (VRF) with Different Refrigerants	211-222
E. Zeynep BİLİGİLİ, Elmas SALAMCI, Abdurrahman ASAN Distaloy AB Tozundan Üretilmiş ve Elmas Nanoparçacık Katkılı Krom Kaplanmış Toz Metal Malzemelerin Korozyon Davranışlarının Araştırılması Investigation of Corrosion Behavior of Powder Metallurgy Materials Produced From Distaloy AB Powders and Electrochemically Coated Chromium With Diamond Nanoparticle Additive	223-230
Suat ALTUN, Musa ESMER Isıl İşlemin Bazı Ağaç Malzemelerde Yüzey Pürüzlülüğü ve Vernik Yapışma Direncine Etkisi The Effect of Heat Treatment on The Surface Roughness and Varnish Adhesion of Wood	231-239
Seçkin KEÇELİ, H. Gürhan YAVUZCAN, Adnan SÖZEN Farklı Rotor Kanat Sayısına Sahip Francis Türbin Modellerinde Akış Etkilerinin İncelenmesi Examination of Flow Effects in Francis Turbine Models with Different Numbers of Rotor Blades	241-249

POLİTEKNİK DERGİSİ

Journal of Polytechnic

POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CİLT 20 NUMBER / SAYI 1 MARCH / MART 2017

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

Cilt / volume : 20

Sayı / number : 1

Mart / March : 2017

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 20 SAYI 1) KATKI VEREN HAKEMLER

Abdulmecit TÜRÜT	İsmail TOPALOĞLU
Adnan SÖZEN	Jacob NAGLER
Ahmet GÜRAL	M. Tolga ÖZKAN
Ahmet PİNAR	Mahmut GÜLESİN
Ali ÇETİN	MEHMET BUDAKÇI
Ayşe MURATHAN	Metin İPEK
Beşir DANDIL	Metin KESLER
Burak AKIN	Murat ÇOLAK
Bülent VURAL	Murat DENER
Çetin KARATAŞ	Murat GÖK
Derya DİŞPİNAR	Mustafa ÖKSÜZ
Dilek AKBULUT	Nadire Şule ATILGAN
Ergün TUNCAY	Necmi ALTIN
Ersin NAMLI	Nihat ÖZTÜRK
Fatih ŞAHİN	Oğuzhan YILMAZ
Fulya ASLAY	Onuralp ULUER
Gökhan KÜÇÜKTÜRK	Ramazan BAYINDIR
Gül TATAR	Recep YENİTEPE
Gülben ÇALIŞ	Sarp ADALI
Hakan ATAHAN	Selim PUL
Hakan DİLİPAK	Selis ÖNEL
Hakan GÜRÜN	Serdar YÜCESU
Halit YAZICI	Songül DUMAN
Hamit SOLMAZ	Süleyman TAŞGETİREN
Hüdayim BAŞAK	Tayfun MENLİK (2 kez)
Hüseyin BAYRAKÇEKEN	Ulaş CAYDAŞ
İbrahim ÇİFTÇİ	Ulvi ŞEKER
İbrahim KARAĞAÇ	Yasin KABALCI
İhsan KORKUT	Zafer TEKİNER

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, Erdem ÇİFTÇİ**

Dizgi / Compositor : **İdris ÖZÇELİK**

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

Üç Boyutlu Yazıcı ve Tarayıcı ile Hastaya Özel Medikal Ortez Tasarımı ve Geliştirilmesi

Levent AYDIN¹, Serdar KÜÇÜK^{1*}

¹Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü,
Umuttepe Kampüsü, 41380, Kocaeli, Türkiye
(Geliş/Received : 25.03.2016 ; Kabul/Accepted : 19.10.2016)

ÖZ

Üç boyutlu (3b) yazıcılar, günümüzde birçok alanda kullanılan ve hızla gelişen bir teknolojidir. Bu çalışmada, öncelikle bir üç boyutlu yazıcı açık kaynak kodlu donanımın geliştirilmesiyle imâl edildi ve açık kaynak kodlu yazılımının iyileştirilmesiyle kontrol edildi. Daha sonra bu üç boyutlu yazıcıyı kullanarak ayak bileği ortezi (ankle foot orthosis, AFO) üretildi.

İnsan yürümesi için son derece önemli olan ayak bileği ortezleri deformasyonları önlemek ve bilek hareketini kontrol etmek için üretilir. Bir AFO genellikle zayıf bacağı korumak, bilek ve ayağı doğru pozisyonda tutmak ve adım atmayı düzeltmek için kullanılır. Son kullanıcı farklı boyutlarda bilek ve farklı tipte deformasyonlara sahip olabileceğinden bir AFO son kullanıcının ayağına tam uygun bir şekilde üretilmelidir. Dolayısıyla seri üretilen AFO'lar her bir son kullanıcı için uygun olmayabilir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda üç boyutlu yazıcılar kişiselleşmiş biyomedikal ekipman üretiminde öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, özel bir AFO öncelikle bir CAD yazılımı ile modellendi ve daha sonra bu model geliştirilen yazıcıyla üretildi. Bu çalışma ülkemiz literatüründe bilinen ve üç boyutlu yazıcı ile üretilen ilk ayak bileği ortezidir. Ayrıca bu çalışma üç boyutlu yazıcılarla biyomedikal malzemelerin daha kısa zamanda ve daha ekonomik bir şekilde üretilebileceğini kanıtlamıştır.

Anahtar Kelimeler: 3b Yazıcı, Ayak Bileği Ortezi, Reprap.

Design and Construction of Ankle Foot Orthosis By Means Of Three Dimensional Printers

ABSTRACT

Three dimensional (3d) printer technologies are rapidly developing and increasingly being used in several fields. In this study, as a first step a 3d printer is constructed by modifying open source hardware and controlled by improving open source software. Subsequently, an ankle foot orthosis (AFO) is designed and constructed by using this 3d printer.

The ankle foot orthosis, very important for human walking, is designed to control motion of the ankle and prevents deformities. An AFO can generally be used for following purposes: brace weak limbs, grasp ankle and foot in the right position and correct the foot drop. Since the users have different sizes of ankles and different types of deformities, an AFO must be produced to match in size to the end-user. Therefore off-the-shelf AFOs may not suitable for the each end user. Considering these factors, 3d printers are of great importance for producing individualized biomedical equipment. In this study, a distinctive ankle foot orthosis is first modelled by using CAD software and then produced by using constructed 3d printer. This AFO is the first ankle foot orthosis produced by a 3d printer in the literature of our country. This study is a proof that biomedical equipments can be produced in a shorter time and less costly by using 3d printers.

Keywords: 3d Printer, Ankle Foot Orthosis, Reprap.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

3b baskı [1], herhangi bir yerden hazır olarak bulunabilen ya da kişisel olarak oluşturulan 3 boyutlu modelin, katı formda çıktısının alındığı işlemdir. Elde edilen bu maddesel çıktı, iki boyutlu (2b) katmanların üst üste sıralanmasıyla oluşmaktadır. 3b baskı, günümüz endüstrisinde de kullanılmakta olan; kesme ve delme yöntemleri ile malzemenin çıkarılmasına dayanan gele-

neksel işleme tekniklerinden farklı kabul edilmektedir [1]. Bunun nedeni 3b baskı teknolojisinin, üretim sürecinde talaş kaldırma yöntemi yerine sadece gerektiği kadar malzemeyi kullanarak gerçekleştirmesinden kaynaklanmaktadır.

Şekil 1'de görüldüğü gibi 3b yazıcı, bilgisayar kontrolü altında 3b nesne oluşturabilen bir robot türüdür [2].

3b baskı teknolojisi, 1986'dan bu yana var olmasına rağmen 2010'dan sonra piyasada yaygın olarak kullanılmaya başlanılmıştır. 3b yazıcılar, önceleri pahalı ve kullanımı beceri gerektiren cihazlardı [3]. İlk çalışan

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: skucuk@kocaeli.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 1-8

3b yazıcı, Chuck Hull tarafından 1984 yılında oluşturuldu [4]. Özellikle 2010'dan günümüze kadar bu makinelerin satışlarında büyük bir artış olmuş ve bunların fiyatları önemli ölçüde düşmüştür [5].

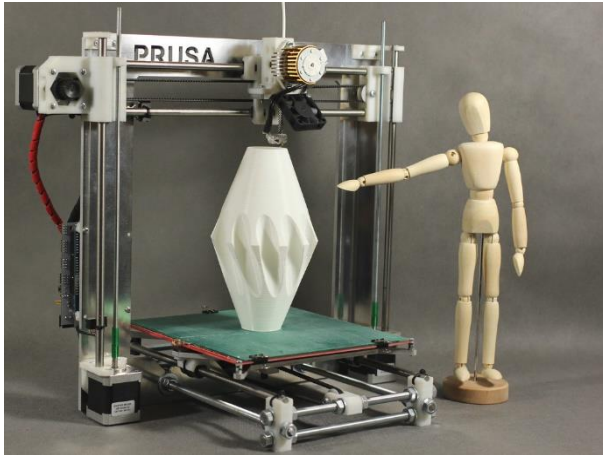
3b yazıcılar, günümüzde hemen hemen bütün 3b modelleme yazılımlarından ortak olarak çıktı alınabilen STL uzantısını kullanmaktadır.

3b baskı teknolojisi, endüstriyel tasarım, mühendislik, mimarlık, askeri, medikal sektörü, biyoteknoloji, moda, gıda ve diğer birçok alanda kullanılmaktadır [6].

3b baskı teknolojisinde yazdırma işlemi, Erimiş Birikimi Modelleme (FDM), Mürekkep Püskürtmeli (ink-jet), sinterleme (SLS - Seçici Lazer Sinterleme, DLMS - Doğrudan Lazer Metal Sinterleme), Seçici Lazer Ergitme (SLM), Laminalı Nesne İmalatı (LOM) ve benzeri üretim teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir [7].

Açık kaynak kodlu yazıcılar, kendi parçalarını üretebilmektedir [8]. Ayrıca 3b yazıcılar ile tek seferde çalışan mekanik parçaların (el aletleri, İngiliz anahtarları ve iç içe geçmiş olan dişli çarklar gibi) çıktısı da alınabilmektedir [1].

3b yazıcılar, tüketimi azaltarak üretimi arttırmaktadır [9].



Şekil 1. RepRap Prusa (RepRap Prusa) [2]

2. TEMEL KAVRAMLAR (BASIC CONCEPTS)

Katkılı üretim terimi, sıralı katmanlar sayesinde 3 boyutlu nesne oluşturma teknolojilerini ifade etmektedir. Eksiltme ile imalat terimi, bir maddenin, malzeme çıkarmaya dayalı olarak işlenmesidir.

Stereolitografi terimi, Charles W. Hull tarafından 1984 yılındaki bir patentinde üç boyutlu nesnelerin, enine kesitler oluşturularak üretilmesine yönelik bir işlem olarak tanımlanmıştır [4].

Dövme, perçinleme ve kaynak işleme katkılı üretim tekniklerine, delme, taşlama ve frezeleme de eksiltme ile imalat tekniklerine örnektir. 3b baskı ise katkılı üretim tekniklerinin stereolitografi işlemi ile gerçekleştirilmesidir.

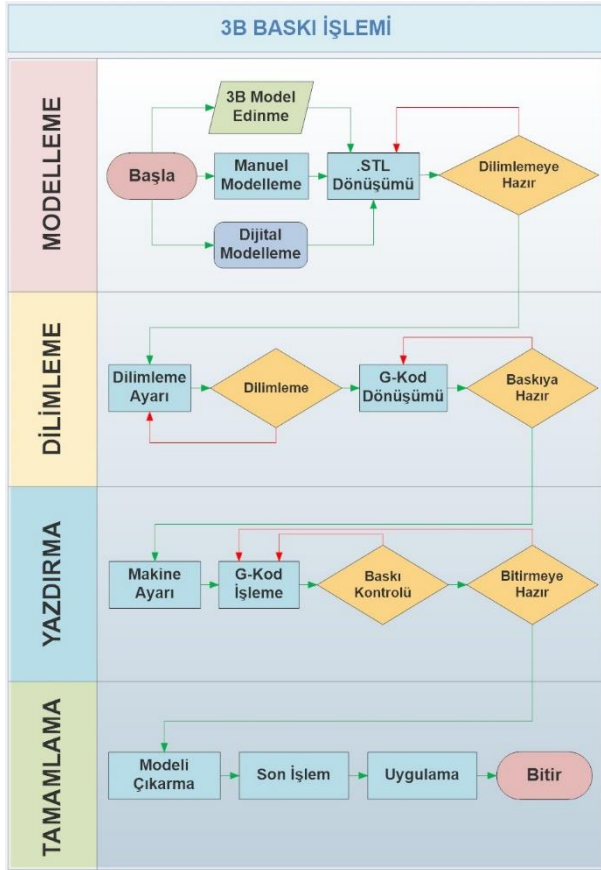
3b yazdırılabilir modeller, bir bilgisayar destekli tasarım yazılımı ya da 3b tarayıcı aracılığıyla oluşturulan, nesneye ait dijital çizimlerdir. Elle modelleme süreci, gerçek nesneye ait geometrik verileri ve 3b tarama da gerçek nesneye ait dijital 3 boyutlu noktalar kümesini ifade etmektedir [6].

3b modellerin manuel (el) ya da otomatik (3b tarayıcı) oluşturulması herkes için mümkün olmamaktadır. Son yıllarda birkaç 3b baskı pazarının ortaya çıkması bundandır. Bu platformlar insanlara ücretli ya da ücretsiz olarak milyonlarca 3b yazdırılabilir model sunmaktadır. En popülerleri arasında Shapeways, Thingiverse ve Threeding yer almaktadır [1].

Şekil 2'de akış diyagramı verilen üç boyutlu yazıcı ile yazdırma işlemi modelleme, dilimleme, yazdırma ve tamamlama olmak üzere dört ana başlıktan oluşmaktadır. Modelleme adımı, bir bilgisayar destekli tasarım programı ya da bir 3b tarayıcı kullanılarak gerçek nesneye ait 3b model oluşturulmaktadır. Bu model daha sonra pek çok CAD/CAM yazılımlarında ortak olarak bulunan STL dosya uzantısıyla kaydedilmektedir [6]. Dilimleme adımı, STL olarak kaydedilen 3b model, bir dilimleme algoritması kullanılarak belirli kalınlıklarda enine 2b kesitlere ayrılmaktadır. Bu kesitler, pek çok otomasyon işlemlerinde ortak olarak kullanılan ve G-Kod olarak adlandırılan kodlara dönüştürülmektedir. Bu kodlar, makinenin anlayacağı dilde her bir 2b katman için belirlenen noktalarda ve belirlenen miktarlarda malzeme işlenmesini sağlayan kod bilgilerini içermektedir [6]. Yazdırma adımı, 3b yazıcı G-Kod'lar vasıtasıyla, her bir 2b katmanı birbiri ardına sıralayarak 3b gerçek nesnenin el ile tutulabilen katı modelini oluşturmaktadır. Bu katı modellerin oluşturulmasında isteğe bağlı olarak sıvı, toz ya da katı herhangi bir polimer malzeme kullanılabilir [6]. Tamamlama adımı, 3b yazdırma işlemi sonrasında oluşan katman çizgileri ısı işlemler, gaz ve çözelti gibi yöntemler kullanılarak yok edilmektedir. Böylece malzeme yüzeyinin pürüzsüzleştirilmesi sağlanmaktadır.

Yazıcı çözünürlüğü, katman kalınlığı ve dpi (inç başına nokta) olarak ya da mikrometre (μm) ile ifade edilmektedir. Bir model basımı, kullanılan yöntem, modelin boyutuna ve karmaşıklığına bağlı olarak, birkaç saatten birkaç güne kadar sürebilmektedir [1]. Bazı katkı üretim teknikleri parçaların üretimi süresince birden fazla malzeme kullanma yeteneğine sahiptir. Bazıları aynı anda birden fazla renk ve renk kombinasyonları yazdırabilmektedir. Bazıları da oluşturulurken destekler kullanmaktadır. Bu destekler yapım sırasında sarkan yapıları desteklemek için kullanılmaktadır. Destekler baskı tamamlanınca çıkartılabilir veya eriyebilir türden seçilmelidir [1].

Enjeksiyon kalıplama gibi geleneksel teknikler, ürünlerin seri imalatı için uygun maliyetli olabilir ancak katkılı üretim, nispeten küçük miktarlarda parçalar üretilirken daha hızlı, daha esnek ve daha ucuzdur [1].



Şekil 2. 3b baskı işlemi akış diyagramı (3d printing flowchart) [6]

Yazıcı ile üretilen nesnelerin çözünürlükleri pek çok uygulama için yeterli olmasına rağmen, nesne, istenen boyutta ölçeklendirilebilir ya da daha yüksek çözünürlükte yazdırılabilmektedir [10].

Günümüzde çok sayıda katkılı üretim yöntemleri mevcuttur. Selektif lazer eritme (SLM) ya da doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS), selektif lazer sinterleme (SLS), erimiş birikimi modelleme (FDM) gibi bazı yöntemler katmanların üretilmesi için malzemeyi eritirken ya da yumuşatırken, diğer metotlar stereolitografi (SLA) gibi farklı gelişmiş teknolojileri kullanarak sıvı malzemeleri (reçine) birleştirmektedir [7].

Çizelge 1’de görüldüğü gibi baskı teknolojileri sınıflandırılabilir [7]. Her yöntemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır [11].


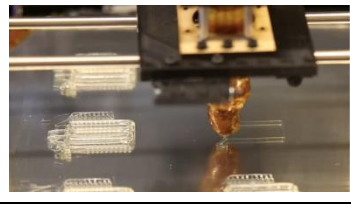
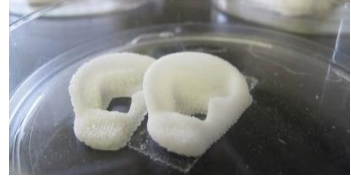
Katkılı üretimin amacı, yeni parça ve cihaz prototiplerinin geliştirilmesinde maliyet ve üretim çıktılarının tesliminde zaman kazandırmaktır. Eskiden sadece malzeme çıkarma özelliğine sahip olan yöntemlerle üretilen parçalar, şimdi katkılı üretimle daha uygun bir şekilde üretilmektedir [12].


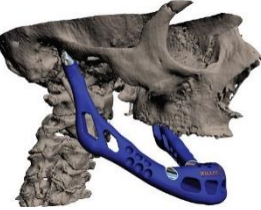

Uygulama alanları, endüstriyel tasarım, prototiplendirme, metal dökümü, mimarlık, sağlık, coğrafya, eğitim ve eğlenme alanları gibi pek çok alanı içermektedir. Çizelge 2’de 3b baskı teknolojileri kullanılarak sağlık alanında üretilen çözümler yer almaktadır.

Çizelge 1. 3b baskı teknolojileri (3d printing technologies) [7]

Tip	Teknolojiler	Malzemeler
Ekstrüzyon	Kaynaşmış birikim modelleme (FDM)	Polilaktikasit (PLA), Akriilonitril bütadien stiren (ABS)
Bağlama	Elektron ışını serbest fabrikasyon (EBF ₃)	Neredeyse bütün metal alaşımlar
Granüler	Doğrudan metal lazer sinterleme (DMLS)	Neredeyse bütün metal alaşımlar
	Elektron ışını ergitme (EBM)	Titanyum alaşımları
	Seçici lazer eritme (SLM)	Titanyum alaşımları, paslanmaz çelik, alüminyum
	Seçici ısı sinterleme (SHS)	Termoplastik toz
Toz yatak ve mürekkep püskürtmeli 3b baskı	Seçici lazer sinterleme (SLS)	Termoplastik, metal tozları, seramik tozları
	Alçı tabanlı 3b baskı (PP)	Alçı
Katmanlı	Lamine nesne imalatı (LOM)	Tabaka, metal folyo, plastik folyo
Işık polimerize	Stereolitografi (SLA)	Fotopolimer
	Dijital ışık işleme (DLP)	Fotopolimer

Çizelge 2. Sağlık alanında 3b baskı teknolojileri (3d printing technologies in medicine field)

Uygulamalar	Ref.
	[13]
	[14]
	[15]

	Pelvis kemiği	[16]
	Alt çene implantı	[17]
	Protez	[18]

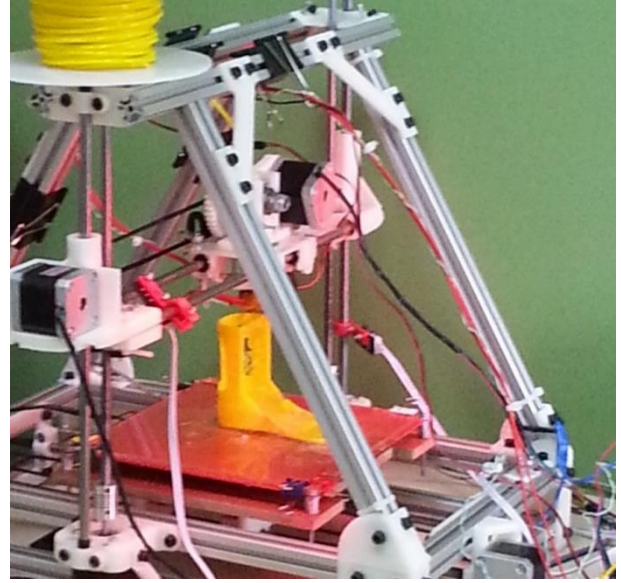
3. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

S. Scott Crump tarafından icat edilen FDM baskı teknolojisinin patent koruma süresinin sona ermesi ile açık kaynak kodlu donanım ve yazılım kullanımı yaygınlaşmıştır [19]. Açık kaynak kod geliştirici topluluklar oluşarak, 3b baskı teknolojilerinin açık ve anlaşılır hâle getirilmesi sağlanmıştır [1]. RepRap (Replicating Rapid-prototyper), insanlara pek çok 3b yazıcıyı açık kaynak kodlu donanım hâlinde sunan ve günümüzde de giderek yaygınlaşan en büyük açık kaynak kodlu projelerden birisidir. Bu proje, araştırmacılara kişiselleştirilmiş 3b yazıcı tasarımı ve üretimi imkânı sağlamaktadır [1].

MendelMax (MM) Maxbots tarafından 2011'in Kasım ayında tasarlanan açık kaynak kodlu bir RepRap 3b yazıcısıdır [1]. Şase bileşenleri olarak ucuz alüminyum ekstrüzyon ve basılı destekler kullanılmaktadır [1]. Bileşenleri dünya genelinde çeşitli tedarikçilerden sağlanabilmektedir. MM 1.5, MM 3b yazıcısının iyileştirilmiş bir versiyonudur.

3.1. Montaj Aşaması (Assembly Stage)

Bu çalışmada 3b baskı için kit olarak temin edilen MM 1.5 üzerinde bazı mekânîk, elektronik ve yazılımsal değişiklikler yapılmıştır. Şekil 3'te montajı tamamlanan MM 1.5 3b yazıcısı görülmektedir.



Şekil 3. MM 1.5 (MM 1.5)

Mekanik bileşenlerde yapılan değişiklikler [1]:

1. X eksen plastik bileşenleri standart kit dahilinde olmayan daha rijit plastik bileşenler ile değiştirilmiştir. Y ve Z eksenlerinde bulunan ve lineer hareketliliğe yardımcı 608ZZ rulmanlar yerine LM8UU rulmanlar kullanılmıştır. Böylece o eksen üzerinde ki hareketli parçalarda eksen kaçıklıkları azaltılarak daha doğrusal hareket etmeleri sağlanılmıştır.
2. 12 dişli T5 zamanlayıcı kasmağı ve kayışı yerine 16 dişli GT2 zamanlayıcı kasmağı ve kayışı kullanılmıştır. Böylece yazıcının çözünürlüğü artırılmıştır.
3. Kontrol kartını ve motor sürücülerini soğutmak için fan eklenilmiştir.
4. Sigma profillerin içeride kalan boş kanallarına aydınlatma amaçlı led yerleştirilmiştir.

Elektronik bileşenlerde yapılan değişiklikler [1]:

1. RAMPS 1.4 kontrol kartı yerine daha fazla bileşenin (termokupl, hassas motor sürücülerini) kullanımını destekleyen Megatronics v2 kullanılmıştır.
2. A4988 step motor sürücülerini (1/16) daha hassas çalışan DRV8825 (1/32) step motor sürücülerini ile değiştirilmiştir. Böylece yazıcının çözünürlüğü artırılmıştır.
3. 1.8° Nema 17 step motorlar daha hassas çalışan 0.9° Nema 17 step motorlar ile değiştirilmiştir. Böylece yazıcının çözünürlüğü artırılmıştır.
4. 100K NTC termistörler yerine daha hassas sıcaklık ölçümü yapan K-Tip termokupl kullanılmıştır.

Yazılımda yapılan değişiklikler [1]:

1. K-Tip termokupl ve pinleri Firmware içerisinde tanımlanmıştır.
2. Fanlar ve pinleri Firmware içerisinde tanımlanmıştır.

3. Host yazılımı, Slic3r ve Firmware parametreleri optimize edilmiştir.

Çizelge 3'te 3b baskı için kullanılmış EEPROM parametreleri görülmektedir.

Çizelge 3. EEPROM parametreleri (Eeprom parameters)

NO	ADI	DEĞER
1	Baudrate	115200
2	Filament printed (m)	-
3	Printer active (s)	-
4	Max. inactive time (ms, 0=off)	0
5	Stop stepper after inactivity (ms, 0=off)	360000
6	X-axis steps per mm	160.0000
7	Y-axis steps per mm	160.0000
8	Z-axis steps per mm	5120.0000
9	X-axis max. feedrate (mm/s)	150.000
10	Y-axis max. feedrate (mm/s)	150.000
11	Z-axis max. feedrate (mm/s)	2.000
12	X-axis homing feedrate (mm/s)	40.000
13	Y-axis homing feedrate (mm/s)	40.000
14	Z-axis homing feedrate (mm/s)	2.000
15	Max. jerk (mm/s)	20.000
16	Max. Z-jerk (mm/s)	0.300
17	X home pos (mm)	0.000
18	Y home pos (mm)	0.000
19	Z home pos (mm)	0.000
20	X max length (mm)	200.000
21	Y max length (mm)	200.000
22	Z max length (mm)	200.000
23	X-axis acceleration (mm/s ²)	500.000
24	Y-axis acceleration (mm/s ²)	500.000
25	Z-axis acceleration (mm/s ²)	0.000
26	X-axis travel acceleration (mm/s ²)	250.000
27	Y-axis travel acceleration (mm/s ²)	250.000
28	Z-axis travel acceleration (mm/s ²)	0.000
29	Autolevel active (1/0)	0
30	Bed heat manager (0-3)	0
31	Bed PID drive max	255
32	Bed PID drive min	80
33	Bed PID P-gain	196.000
34	Bed PID I-gain	33.000
35	Bed PID D-gain	290.000
36	Bed PID max value (0-255)	255
37	Extr. 1 steps per mm	675.000
38	Extr. 1 max. feedrate (mm/s)	20.000
39	Extr. 1 start feedrate (mm/s)	15.000
40	Extr. 1 acceleration (mm/s ²)	2000.000
41	Extr. 1 heat manager (0-3)	3

42	Extr. 1 PID drive max	230
43	Extr. 1 PID drive min	40
44	Extr. 1 PID P-gain/dead-time	7.0000
45	Extr. 1 PID I-gain	2.0000
46	Extr. 1 PID D-gain	40.0000
47	Extr. 1 PID max value (0-255)	255
48	Extr. 1 X-offset (steps)	0
49	Extr. 1 Y-offset (steps)	0
50	Extr. 1 temp. stabilize time (s)	1
51	Extr. 1 temp. for retraction when heating (C)	150
52	Extr. 1 distance to retract when heating (mm)	0
53	Extr. 1 extruder cooler speed (0-255)	255

3b yazıcıları kullanabilme, bu alanla ilgili beceri gerektirmektedir. Host (3b yazıcı ile bilgisayar arasında iletişimin sağlanması) yazılımının ayarlarının yapılması, cihazın bilgisayara tanıtılması ve manuel kontrolün nasıl gerçekleştiği bilinmelidir.

Montaj tamamlandıktan sonra donanımsal kalibrasyonların yapılması gerekmektedir. Bu işlem yazıcılara göre değişmektedir.

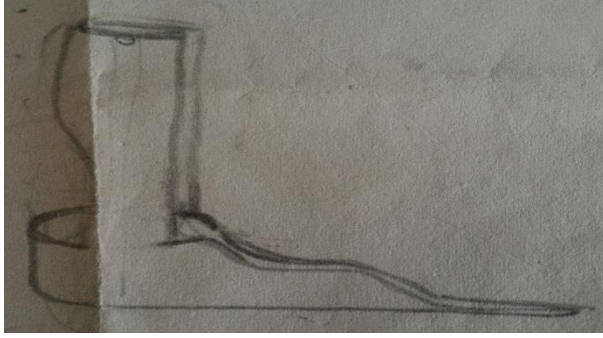
Kalibrasyon yapıldıktan sonra sırasıyla Firmware'in oluşturulması ve cihaz ile bilgisayar arasında iletişimi sağlayacak olan Host yazılımının konfigürasyonu gelmektedir. Bütün bu adımlar gerçekleştirildikten sonra 3b yazıcıdan çıktı alınabilmektedir.

Üç boyutlu baskı teknolojileri dünya genelinde popüler olarak çalışılan ve özellikle sağlık alanında umut vaat eden çözümler üreten bir teknolojidir. Bu teknolojilerden yararlanabilme bu alanda beceri ve deneysel çalışmayı gerektirmektedir. Yapılan bu değişiklikler ile mevcut 3b yazıcıdan daha kaliteli bir çıktı alınabilmesi ve dolayısı ile hasta üzerinde olumsuz bir etkinin oluşmaması amaçlanmıştır. Bu olumsuz etkiyi en aza indirmek adına, çıktı yüzeyinde baskı işlemi sonrası oluşan katman çizgilerinin vücut ile doğrudan temas etmemesi düşünülmüş ve herhangi bir kimyasal son işlem (aseton banyosu vb.) gerekmeksizin çıktı kalitesinin artırılması üzerinde durulmuştur.

3.2. AFO Modeli (Ankle-Foot Orthosis Model)

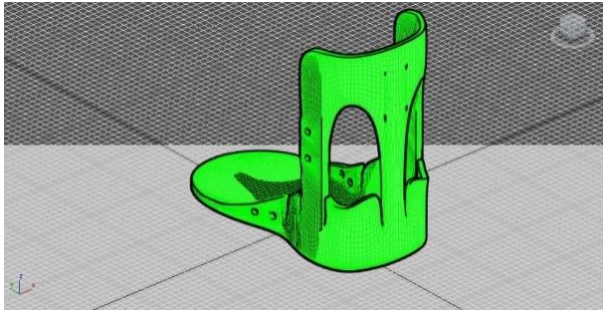
AFO (Ankle-Foot Orthosis - Ayak Bileği Ortez), ayak bileğini sabitlemeye, yürümeyi kolaylaştırmaya ve vücut dengesini sağlamaya yarayan ortezdir [20]. Ameliyat sonrasında da ekstremitayı korumak ve sabitlemek amacıyla kullanılabilir [18]. Bu ortezler ilgili kısma vücudun dışından uygulanmaktadır. Ortez seçimini etkileyen pek çok parametre vardır. Şüphesiz kişiye özel olarak üretilerek, amacına tam uygunluk göstermesi ve ideal olması önemlidir [21].

Bu çalışmada ayak bileği ortezi ilk olarak kâğıt üzerinde şekillendi. FDM baskı teknolojisi kullanılarak gerçekleştirilen baskıda tek parça çıktı alınmasına karar verildi ve bu sebeple rijit AFO tasarlandı. Şekil 4'te kâğıt üzerinde tasarlanan AFO modeli görülmektedir.



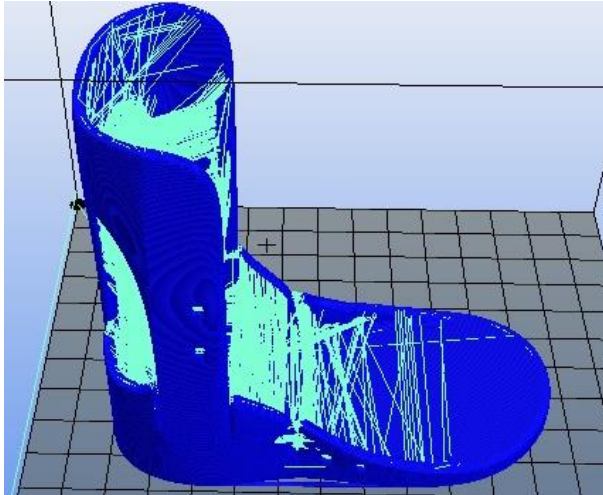
Şekil 4. AFO'nun kağıt üzerinde tasarımı (AFO prototype sketch)

Kağıt üzerinde tasarlanan model, 3ds Max ile 3b modellendi. Şekil 5'te 3b AFO modeli görülmektedir.



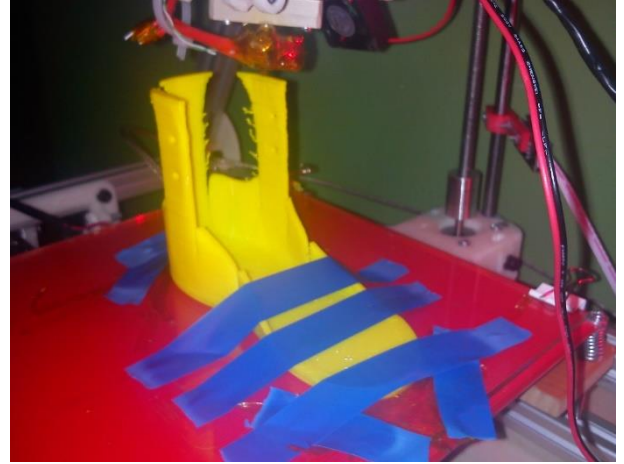
Şekil 5. AFO'nun 3b modellenmesi (Modelling AFO prototype)

Modelleme adımı tamamlandıktan sonra Slic3r ile 3b AFO modeli 2b ince katmanlara ayrılarak G-Kod dönüşümü gerçekleştirildi. Şekil 6'da 2b ince katmanlara ayrılan AFO modeli görülmektedir.



Şekil 6. AFO modelinin dilimlenmesi (Slicing 3d model of the AFO)

Dilimleme adımı tamamlanan model Repetier Host yazılıma aktarılarak baskıya hazır hale getirildi. Polilaktik asit malzeme kullanılarak yaklaşık 8 saat süren yazdırma işleminde çözünürlük 200 mikron olarak ayarlandı. Şekil 7'de AFO modelinin basımı görülmektedir.



Şekil 7. AFO'nun yazdırılması (3d printing of the AFO prototype)

Çıktının AFO olarak kullanılabilmesi adına medikallerde bulunan mevcut AFO'ların yapısı ve kalitesi incelendi. Elde edilen bu çıktının altına kaymaz ayak altlığı, tabanına ortopedik ayak tabanlığı, içine cilde zarar vermeyen yumuşak deri malzeme ve son olarak da ayağı bilekten ve üstten olmak üzere 2 ayrı noktadan da dengeli bir şekilde kavramaya ve sabitlemeye yarayan cırt bant eklendi. Şekil 8'de AFO çıktısı görülmektedir.



Şekil 8. AFO prototipi (Final AFO prototype)

Bu çalışmada üretilen medikal ortez herhangi bir hastaya özel üretilmemiş olup, prototip niteliğindedir. Mevcut tasarım, özgün olmakla birlikte, AFO prototipi herhangi bir hastanın uzvuna uygulanabilme özelliğine sahiptir. Hasta uzvunun üç boyutlu görüntülenmesinde üç boyutlu tarama teknolojileri kullanılmaktadır. Tarama sonucunda elde edilen noktalar kümesi, işlenebilir modele

dönüştürüldükten sonra mevcut ortez modeli, referans uzvun anatomisine göre şekillendirilmektedir. Şekil 9'da bu işlemler sıra ile görülmektedir.

Bu esnada hasta uzvunun özellikle gerçek zamanlı tarama teknolojisine sahip bir 3b tarayıcı ile taranması, hedef geometrinin modellenmesinde kayıp yüzeyler için yüzey tamamlama algoritmalarının kullanılmasından kaynaklanan geometri bozukluklarının önlenmesinde etkilidir.

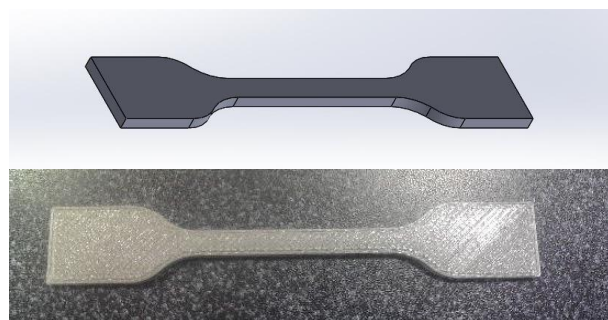
4. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Üç boyutlu yazıcılarla istenilen ölçü ve malzemede biyomedikal ekipman oluşturulabilmektedir. Bu teknoloji yeni yeni gelişmekte olup bu alanda ilerleyen zamanlarda insanlara çok daha fazla yarar sağlayacağı kaçınılmazdır.

Bu çalışmada yer alan AFO modeli, uzun sabitlenmesinde kullanılacağından, statik yük testlerinin gerçekleştirilmesinde referans olarak kullanılacak olan yük hastanın ağırlığı kadar olup ortezin iç yüzeyi üzerine uygulanması gerekmektedir. Ortez, üretim esnasında farklı basım parametreleri ile iç doluluk oranı, 2b katmanlarda yer alan termoplastik polimerin üst üste yapışma açısı ve pek çok farklı özellikleri ayarlanabilmektedir. Bu da doğrudan kullanılan malzeme miktarını etkilemekle birlikte ortez dayanımını ve baskı parametrelerini hasta ağırlığına göre belirleme imkânı sağlayacaktır. Şekil 10'da, malzeme dayanımını belirlemek için gerçekleştirilen çekme testinde kullanılmak üzere 3b yazıcı ile belirli baskı parametrelerinde hazırlanabilecek test numuneleri görülmektedir.



Şekil 9. a) 3b tarama işlemi (3d scanning process), b) Referans hedef uzvun anatomisi (3d model of target limb anatomy), c) Ortez tasarımının hasta anatomisine göre şekillendirilerek uygulanması (Customization of the model)



Şekil 10. a) Test numunesinin 3b modeli (3d model of specimen), b) Test numunesinin 3b yazıcıdan alınan çıktısı (3d printed specimen)

Malzeme analizinde sıklıkla kullanılan çekme ve darbe testlerinde ki numunelerin, medikal ortez üretiminde kullanılan baskı parametreleriyle aynı üretilmesi ve bu şekilde dayanıklılık testlerinin gerçekleştirilmesi, termoplastik malzemenin dayanımını ve üst üste oluşan 2b katmanlardaki yapışma miktarını gerçeğe en yakın şekilde belirlemeyi sağlayacaktır. Ayrıca sağlamlık testi için, hasta ağırlığının statik yük olarak ortez üzerine uygulanması gerek SolidWorks Simulation kullanılarak gerekse de bir hidrolik pres makinesi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu şekilde medikal ortez dayanımının ve malzeme özelliklerinin test sonuçlarına göre hastaya uygunluğu belirlenebilmektedir. Hasta ağırlığına göre basım parametreleri kullanılarak fazla malzeme kullanımının önlenmesi doğrudan üretim sürecinde harcanan zamanı düşürmektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

İnsan yürümesi için son derece önemli olan ayak bileği ortezleri deformasyonları önlemek ve bilek hareketini kontrol etmek için üretilir. Bir AFO genellikle zayıf bacağı korumak, bilek ve ayağı doğru pozisyonda tutmak ve adım atmayı düzeltmek için kullanılır. Son kullanıcı farklı boyutlarda bilek ve farklı tipte deformasyonlara sahip olabileceğinden bir AFO son kullanıcının ayağına tam uygun bir şekilde üretilmelidir. Dolayısıyla seri üretilen AFO'lar her bir son kullanıcı için uygun olmayabilir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda üç boyutlu yazıcılar kişiselleşmiş biyomedikal ekipman üretiminde öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, özel bir AFO öncelikle bir CAD yazılımı ile modellendi ve daha sonra bu model geliştirilen yazıcıyla üretildi. Bu çalışma

ülkemiz literatüründe bilinen ve üç boyutlu yazıcı ile üretilen ilk ayak bileği ortezidir.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Aydın L, "Üç boyutlu yazıcıyla ayak bileği ortezinin tasarımı ve geliştirilmesi", *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2014).
- 2) *Wikipedia C*, "3d Printing" [Online], Ziyaret tarihi: 22 Eylül 2015. https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
- 3) Bird J, "Exploring the 3D printing opportunity." *Financ. Times* (2012).
- 4) Hull C W, "Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography", *U.S. Patent 4 575 330 A*, (1984).

- 5) Lipson H and Kurman M, "Fabricated", Indianapolis, IN: **Wiley**, (2013).
- 6) Aydın L, Küçük S, and Kenar H, "Design and construction of a 3d bioprinter for bioprinting of tissues and organs", **Tip Tekno 2015**, Vogue Hotel Bodrum, Muğla, 153-157, (2015).
- 7) Aydın L and Küçük S, "Design and construction of ankle foot orthosis by means of three dimensional printers" **Tip Tekno 2014**, Perissia Hotel & Convention Center, Kapadokya, 129-132, (2015).
- 8) **CNN**, [Online], Ziyaret tarihi: 16 Kasım 2015. <http://whatsnext.blogs.cnn.com/2013/07/31/study-at-home-3-d-printing-couldsave-consumers-thousands>
- 9) Wittbrodt B T, Glover A G, Laureto J, Anzalone G C, Oppliger D, Irwin J L and Pearce J M, "Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers", **Mechatronics**, 23(6): 713-726, (2013).
- 10) **Theengineer**, [Online], Ziyaret tarihi: 11 Ekim 2015. <http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/the-rise-of-additivemanufacturing/1002560.article>
- 11) **Economist**, [Online], Ziyaret tarihi: 11 Ekim <http://www.economist.com/node/10105016>
- 12) **Wikipedia C**, "3d Printing" [Online], Ziyaret tarihi: 10 Eylül 2015. https://en.wikipedia.org/wiki/3D_printing
- 13) Murphy S V and Atala A, "3d bioprinting of tissues and organs", **Nature Biotechnology**, 32 (8): 773-785, (2014).
- 14) Bellan L M, Singh S P, Henderson P W, Porri T J, Craighead H G and Spector J A, "Fabrication of an artificial 3-dimensional vascular network using sacrificial sugar structures", **Soft Matter**, 5(7): 1354-1357, (2009).
- 15) Williams R, "3D Printing Human Tissue and Organs to 'Spark Ethics Debate'", **The Telegraph**, 27, (2014).
- 16) Gerrand C, "3D Printing: a clinician's experience", **Bulletin of The Royal College of Surgeons of England**, 96(7): 230-231, (2014).
- 17) Singare S, Dichen L, Bingheng L, Zhenyu G and Yaxiong L, "Customized design and manufacturing of chin implant based on rapid prototyping", **Rapid Prototyping Journal**, 11(2): 113-118, (2015).
- 18) Jin Y A, Plott J, Chen R, Wensman J and Shih A, "Additive Manufacturing of Custom Orthoses and Prostheses—A Review", **Procedia CIRP**, 36, 199-204, (2015).
- 19) Crump S S, Stratasys, Inc., assignee, "Apparatus and method for creating three-dimensional objects", **U.S. Patent** 5121329 A, (1989).
- 20) Pallari J H P vd., "Design and additive fabrication of foot and ankle-foot orthoses", **Proceedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium—An Additive Manufacturing Conference**, Austin, Texas, USA, 834-845, (2010).
- 21) Mavroidis C vd., "Patient specific ankle-foot orthoses using rapid prototyping", **Journal of neuroengineering and rehabilitation**, 8(1): 1, (2011).

On the Yielding of Two-Layer Composite Spherical Pressure Vessels

Tolga AKIŞ

Department of Civil Engineering, Atılım University, İncek-Ankara, Turkey

(Received : 23.01.2016 ; Accepted : 30.05.2016)

ABSTRACT

The yielding of two-layer composite spherical pressure vessels under either internal or external pressure is investigated analytically in the framework of small deformations and von Mises yield criterion. It is shown for both pressure cases that depending on the material properties and sphere dimensions, different modes of plasticization may take place. Unlike the deformation behavior of a single layer spherical pressure vessel, yielding may commence at the inner layer or at the outer layer or simultaneously at both layers of the assembly.

Keywords: Stress Analysis, Spherical Pressure Vessels, von Mises Criterion.

1. INTRODUCTION

The prediction of stresses in commonly used structures such as tubes, shafts, annular disks and pressure vessels is an important topic in engineering practice. The classical problem of a thick-walled spherical pressure vessel under different loading and boundary conditions has been investigated by several researchers in the past. Timoshenko and Goodier [1] derived the expressions of the stresses in a thick-walled sphere subjected to internal and external pressure. Mendelson [2] studied the elastic and elastoplastic deformation behavior of spherical pressure vessels under thermal and pressure loading. Noda et al. [3] derived the stress and displacement expressions of thick-walled spheres under various types of thermal loads. Jiang [4] studied the elastic-plastic response of such assemblies subject to internal and external pressures and radial temperature gradient. Bufler [5] investigated the laminated composite hollow spheres under pressure.

In recent years, analytical studies focusing on pressure vessels made of functionally graded materials (FGM) and multilayered pressure vessels were performed both in elastic and elastoplastic stress states. For example, Guven [6], You et al. [7], Eslami et al. [8], and Chen and Lin [9] treated the FGM spheres under different loading conditions in elastic stress state. On the other hand, Fukui and Yamanaka [10], Horgan and Chan [11], and Tutuncu and Ozturk [12] treated the internally pressurized FGM cylindrical pressure tube problem in elastic stress state. The elastoplastic response of FGM spherical pressure vessels was investigated by Akis [13], while Eraslan and Akis [14] investigated the elastoplastic response of FGM cylindrical pressure vessels, and Jahromi et. al [15, 16] studied the autofrattage of such assemblies. Besides these studies, both the mechanical and thermal stresses in the FGM cylindrical tubes were studied by several researchers such as Jabbari, Sohrabpour and Eslami [17] and Eraslan [18]. The closely related studies on the

pressurized two-layer composite thick-walled tubes may be found in publications [19-22]. Finally, recent studies on spherical and cylindrical pressure vessels can be found in [23-26].

It is evident from the list of the existing literature that the investigation of the yielding behavior of the pressurized two-layer spherical pressure vessel problem by analytical means has not yet been done. It is therefore the main objective of this work to obtain a consistent analytical solution to predict the yielding behavior of such assemblies under pressure. The geometry considered in this study consists of two concentric thick spheres: A sphere layer of inner radius a and outer radius b and a sphere layer of inner radius b and outer radius c . This composite system is subjected to either internal or external pressure. The elastic behavior of the system is investigated analytically and the limiting pressures causing plastic flow are evaluated by the use of von Mises yield criterion. It is shown that, unlike the deformation behavior of a single layer spherical pressure vessel, yielding may start at the inner surface or at the interface of the assembly.

2. FORMULATION AND SOLUTION

Spherical coordinates (r, θ, ϕ) are considered in this problem. In addition, infinitesimal deformations are presumed and the notation of Timoshenko and Goodier [1] is used. For a spherical symmetric deformation case ($\sigma_\theta = \sigma_\phi$), the strain-displacement relations

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}, \quad (1)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad (2)$$

the Hooke's law

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E}(\sigma_r - 2\nu\sigma_\theta), \quad (3)$$

$$\varepsilon_\theta (= \varepsilon_\phi) = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_\theta)] \quad (4)$$

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: tolga.akis@atilim.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 9-16

and the equation of equilibrium

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = 0 \quad (5)$$

form the basis for the analysis. In these equations, ε_j represents the normal strain, u the radial displacement, r the radial coordinate, E the modulus of elasticity, σ_j the normal stress, and ν is the Poisson's ratio. A straight forward manipulation on the equations above leads to stress-displacement relations:

$$\sigma_r = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[2\nu \frac{u}{r} + (1-\nu)u' \right], \quad (6)$$

$$\sigma_\theta (= \sigma_\phi) = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\frac{u}{r} + \nu u' \right], \quad (7)$$

where a prime denotes differentiation with respect to the radial coordinate r . Substituting the stresses from (6) and (7) in the equation of equilibrium (5) one obtains the governing differential equation for the radial displacement in a spherical pressure vessel. The general solution is

$$u(r) = \frac{C_1}{r^2} + C_2 r, \quad (8)$$

where C_1 and C_2 are arbitrary integration constants.

The stresses are then determined as

$$\sigma_r = E \left[-\frac{2C_1}{r^3(1+\nu)} + \frac{C_2}{1-2\nu} \right], \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = E \left[\frac{C_1}{r^3(1+\nu)} + \frac{C_2}{1-2\nu} \right]. \quad (10)$$

For a spherical pressure vessel under internal pressure, the integration constants C_1 and C_2 are determined using boundary conditions $\sigma_r(a) = -P$ and $\sigma_r(b) = 0$ as

$$C_1 = \frac{a^3 b^3 P(1+\nu)}{2(b^3 - a^3)E}, \quad (11)$$

$$C_2 = \frac{a^3 P(1-2\nu)}{(b^3 - a^3)E}. \quad (12)$$

On the other hand, if the pressure is applied externally in radial direction, the boundary conditions read $\sigma_r(a) = 0$ and $\sigma_r(b) = -P$, hence C_1 and C_2 are obtained as

$$C_1 = -\frac{a^3 b^3 P(1+\nu)}{2(b^3 - a^3)E}, \quad (13)$$

$$C_2 = -\frac{b^3 P(1-2\nu)}{(b^3 - a^3)E}, \quad (14)$$

For spherical symmetric case, the deviatoric stress tensor S_{ij} can be written as

$$[S_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_r - \bar{\sigma} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_\theta - \bar{\sigma} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_\phi - \bar{\sigma} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

where $\bar{\sigma}$ is the deviatoric stress given by $\bar{\sigma} = (\sigma_r + 2\sigma_\theta)/3$. The von Mises yield stress, σ_Y , may be expressed as [27]

$$\sigma_Y = \sqrt{\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij}}, \quad (16)$$

and the explicit expression can be obtained as

$$\sigma_Y = |\sigma_r - \sigma_\theta|, \quad (17)$$

by carrying out summations over repeated indices.

Yielding begins as soon as the yield stress σ_Y becomes greater than the uniaxial yield limit σ_0 of the material

and the elastic limit load is obtained from $\sigma_Y = \sigma_0$.

Studies showed that for a single layer spherical pressure vessel, the inner surface is critical for both internal and external pressure cases and yielding always commences at this surface. Hence, the elastic limit pressure P_e can

be obtained from $\sigma_0 = |\sigma_r(a) - \sigma_\theta(a)|$. For both cases, this limit is found as

$$P_e = \frac{2\sigma_0(b^3 - a^3)}{3b^3}. \quad (18)$$

This expression is identical with the elastic limit expression given by Mendelson [2]. As an example, a steel pressure vessel ($E = 200$ GPa, $\nu = 0.3$, $\sigma_0 = 430$ MPa) is considered. To present the numerical results, the following nondimensional variables are used: $\bar{r} = r/b$;

$\bar{\sigma}_j = \sigma_j/\sigma_0$; $\bar{u} = uE/(\sigma_0 b)$; $\bar{P} = P/\sigma_0$. The inner radius of the assembly is taken as $\bar{a} = a/b = 0.7$. For the internal pressure case, using Eq. (18), the elastic limit pressure is obtained as $\bar{P}_e = 0.438$. Using Eqs. (11) and (12), the dimensionless integration constants are calculated as $\bar{C}_1 = C_1/b^3 = 3.19562 \times 10^{-4}$, and $\bar{C}_2 = C_2 = 1.96653 \times 10^{-4}$. The corresponding stresses and displacement are plotted against the nondimensional radial coordinate in Figure 1. In order to monitor the commencement of the plastic flow, the nondimensional stress variable λ_Y is introduced. In accordance with von Mises yield criterion it is obtained from $\lambda_Y = |\bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_\theta|$, which corresponds to the yield stress σ_Y in the plastic core. Note that $\lambda_Y = 1$ at the elastic-plastic border implying onset of plasticization at that location and $\lambda_Y < 1$ in the elastic region. By following the variation of λ_Y in Figure 1, it is seen that yielding commences at the inner surface of the assembly as $\lambda_Y(a) = 1$. For the external pressure case, same steel assembly is considered with $\bar{a} = a/b = 0.6$. The corresponding elastic limit pressure is calculated as $\bar{P}_e = 0.522667$ from Eq. (18).

Using Eqs. (13) and (14), the integration constants are obtained as $\bar{C}_1 = C_1/b^3 = -2.0124 \times 10^{-4}$, and $\bar{C}_2 = C_2 = -5.73333 \times 10^{-4}$. As a result, the profiles for the stresses and displacement shown in Figure 2 are drawn. Since $\lambda_Y(a) = 1$, yielding first begins at the inner surface of the assembly.

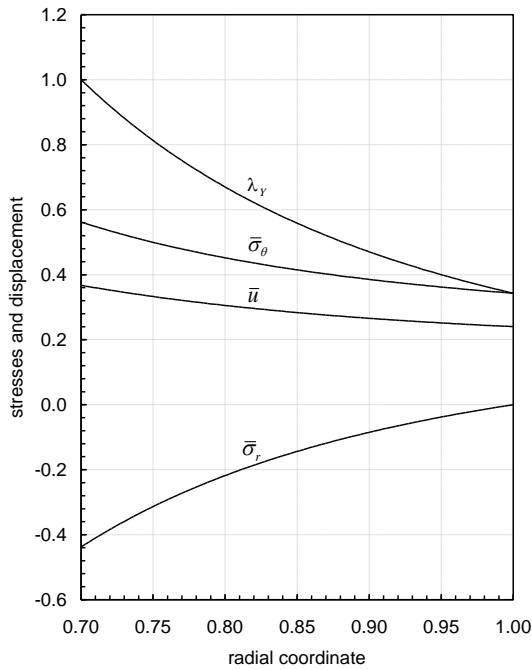


Figure 1. Stresses and displacement in a steel spherical pressure vessel of inner radius $\bar{a} = 0.7$ subject to elastic limit internal pressure $\bar{P}_e = 0.438$.

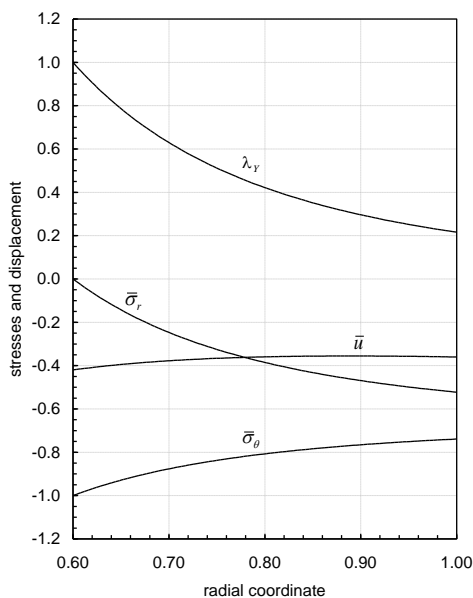


Figure 2. Stresses and displacement in a steel spherical pressure vessel of inner radius $\bar{a} = 0.6$ subject to elastic limit external pressure $\bar{P}_e = 0.522667$.

2.1 Two-Layer Assembly Subject to Internal Pressure

In two-layer composite spherical pressure vessels, same stress and displacement expressions are valid for both layers. However, these expressions contain four unknown integration constants: C_1, C_2 for the inner layer, and C_3, C_4 for the outer layer. For such an assembly subject to internal pressure P , these constants are determined from the boundary conditions $\sigma_r^I(a) = -P$ and $\sigma_r^II(c) = 0$, and the interface conditions $\sigma_r^I(b) = \sigma_r^II(b)$, $u^I(b) = u^II(b)$. Here the superscripts I and II denote inner and outer layers, respectively. The stress components and radial displacement for both layers can be obtained by the use of Eqs. (9), (10), and (8). Application of the above mentioned four nonredundant conditions results in

$$C_1 = \frac{a^3 b^3 P N_1 [2(c^3 - b^3)E_2 M_1 + E_1(2b^3 M_2 + c^3 N_2)]}{2E_1[(c^3 - b^3)E_2(2b^3 M_1 + a^3 N_1) + (b^3 - a^3)E_1(2b^3 M_2 + c^3 N_2)]}, \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{a^3 P M_1 [2b^3 E_1 M_2 - (c^3 - b^3)E_2 N_1 + c^3 E_1 N_2]}{E_1[(c^3 - b^3)E_2(2b^3 M_1 + a^3 N_1) + (b^3 - a^3)E_1(2b^3 M_2 + c^3 N_2)]}, \quad (20)$$

$$C_3 = \frac{a^3 b^3 c^3 P (2M_1 + N_1) N_2}{2[(c^3 - b^3)E_2(2b^3 M_1 + a^3 N_1) + (b^3 - a^3)E_1(2b^3 M_2 + c^3 N_2)]}, \quad (21)$$

$$C_4 = \frac{a^3 b^3 P M_2 (2M_1 + N_1)}{(c^3 - b^3)E_2(2b^3 M_1 + a^3 N_1) + (b^3 - a^3)E_1(2b^3 M_2 + c^3 N_2)}, \quad (22)$$

where

$$N_1 = 1 + \nu_1, M_1 = 1 - 2\nu_1, N_2 = 1 + \nu_2, \\ M_2 = 1 - 2\nu_2. \quad (23)$$

The subscripts 1 and 2 are used to denote material properties (E, ν, σ_0) of the inner and outer layers, respectively. Parametric studies showed that, unlike the deformation behavior of a single layer pressure vessel, different modes of plastic flow may take place. Plastic deformation may first begin at $r = a$ (at the inner surface), or at $r = b$ (at the interface). These two different modes imply the existence of a critical interface radius $b = b_{cr}$ for which the plastic flow begins simultaneously in both layers. The critical interface radius b_{cr} and the corresponding elastic limit pressure P_e can be determined by simultaneous solution of the following two equations:

$$\left| \sigma_r^I(a) - \sigma_\theta^I(a) \right| = \sigma_{01}, \quad (24)$$

$$\left| \sigma_r^II(b_{cr}) - \sigma_\theta^II(b_{cr}) \right| = \sigma_{02}. \quad (25)$$

After some algebraic manipulations, the critical interface radius b_{cr} and the corresponding elastic limit internal pressure are obtained as

$$b_{cr} = \sqrt[3]{\frac{c^3(2E_2M_1 + E_1N_2)\sigma_{02} - D}{4(E_2M_1 - E_1M_2)\sigma_{02}}}, \quad (26)$$

$$P_e = \frac{2\sigma_{02}}{3c^3} \left[c^3 - b^3 + \frac{(b^3 - a^3)[2b^3E_1M_2 + 2(c^3 - b^3)E_2M_1 + c^3E_1N_2]}{a^3E_2(2M_1 + N_1)} \right], \quad (27)$$

where

$$D = \sqrt{c^3\sigma_{02}[c^3\sigma_{02}(2E_2M_1 + E_1N_2)^2 - 8a^3E_2\sigma_{01}(E_2M_1 - E_1M_2)(2M_1 + N_1)]}, \quad (28)$$

It is also found that the existence of the critical interface radius b_{cr} depends mainly on the material properties of the layers of the assembly. The analyses showed that, for instance, in an assembly consisting of steel inner and aluminum outer layers (ST-AL) b_{cr} exists for all a . On the other hand, in an aluminum-steel (AL-ST) assembly b_{cr} does not exist and yielding always commences at the inner surface $r = a$. If the critical interface radius exists, the plastic flow will start at the inner surface for the values of $b > b_{cr}$ and at the interface of the assembly for $b < b_{cr}$. The elastic limit internal pressure that causes yielding at the inner layer at $r = a$ is determined from Eq. (24) as

$$P_e = \frac{2\sigma_{01}}{3b^3} \left[b^3 - a^3 + \frac{a^3(c^3 - b^3)E_2(2M_1 + N_1)}{2E_2M_1(c^3 - b^3) + E_1(2b^3M_2 + c^3N_2)} \right]. \quad (29)$$

The equations above for the integration constants and critical pressures can easily be shown to reduce to the corresponding equations of a single layer spherical pressure vessel under internal pressure by setting $E_1 = E_2 = E$, $\nu_1 = \nu_2 = \nu$, $\sigma_{01} = \sigma_{02} = \sigma_0$ and either $a = b$ or $c = b$.

2.2 Assembly Subject to External Pressure

If the two-layer assembly is subjected to external pressure P , the boundary conditions become $\sigma_r^I(a) = 0$ and $\sigma_r^II(c) = -P$. The interface conditions are the same as the interface conditions for the internal pressure case. Using them to determine the integration constants yields

$$C_1 = -\frac{a^3b^3c^3PN_1(2M_2 + N_2)}{2[(c^3 - b^3)E_2(2b^3M_1 + a^3N_1) + (b^3 - a^3)E_1(2b^3M_2 + c^3N_2)]}, \quad (30)$$

$$C_2 = -\frac{b^3c^3PM_1(2M_2 + N_2)}{(c^3 - b^3)E_2(2b^3M_1 + a^3N_1) + (b^3 - a^3)E_1(2b^3M_2 + c^3N_2)}, \quad (31)$$

$$C_3 = -\frac{b^3c^3PN_2[2b^3E_2M_1 - 2(b^3 - a^3)E_1M_2 + a^3E_2N_1]}{2E_2[(c^3 - b^3)E_2(2b^3M_1 + a^3N_1) + (b^3 - a^3)E_1(2b^3M_2 + c^3N_2)]}, \quad (32)$$

$$C_4 = -\frac{c^3PM_2[2b^3E_2M_1 + (b^3 - a^3)E_1N_2 + a^3E_2N_1]}{E_2[(c^3 - b^3)E_2(2b^3M_1 + a^3N_1) + (b^3 - a^3)E_1(2b^3M_2 + c^3N_2)]}. \quad (33)$$

Making use of Eqs. (24) and (25), the critical interface radius and the elastic limit external pressure are obtained as

$$b_{cr} = \sqrt[3]{\frac{a^3\sigma_{01}(2E_1M_2 + E_2N_1)}{E_1[2(\sigma_{01} + \sigma_{02})M_2 + \sigma_{02}N_2] - 2E_2\sigma_{01}M_1}} \quad (34)$$

$$P_e = \frac{2\sigma_{01}}{3} \left[\frac{c^3 - b^3}{c^3} + \frac{(b^3 - a^3)E_1(2M_2 + N_2)}{2b^3E_2M_1 - 2(b^3 - a^3)E_1M_2 + a^3E_2N_1} \right]. \quad (35)$$

The choice $b = b_{cr}$ leads to plastic flow in both layers (at $r = a$ and $r = b$) simultaneously. Yielding commences at the interface, $r = b$, for the values of b less than b_{cr} . In case $b > b_{cr}$ or when b_{cr} does not exist, plastic flow begins at the inner surface $r = a$. The corresponding elastic limit pressure turns out to be

$$P_e = \frac{2\sigma_{02}}{3b^3} \left[b^3 - a^3 + \frac{(c^3 - b^3)[2b^3E_2M_1 - 2(b^3 - a^3)E_1M_2 + a^3E_2N_1]}{c^3E_1(2M_2 + N_2)} \right] \quad (36)$$

Like in internal pressure case, equations above for the integration constants and critical pressures can be reduced to the corresponding equations of a single layer assembly under external pressure.

3. NUMERICAL RESULTS

A composite system consisting of steel inner ($E = 200$ GPa, $\nu = 0.3$, $\sigma_0 = 430$ MPa) and aluminum outer ($E = 70$ GPa, $\nu = 0.35$, $\sigma_0 = 100$ MPa) layers is considered. To present the numerical results the following non-dimensional variables are used:

$$\bar{r} = \frac{r}{c}; \quad \bar{\sigma}_j = \frac{\sigma_j}{\sigma_{01}}; \quad \bar{u} = \frac{uE_1}{\sigma_{01}c}; \quad \bar{P} = \frac{P}{\sigma_{01}} \quad (37)$$

3.1 Assembly Subject to Internal Pressure

The inner radius of the assembly is taken as $\bar{a} = a/c = 0.75$. In case the assembly subject to internal pressure, the critical interface radius and the corresponding critical elastic limit pressure are calculated as $\bar{b}_{cr} = b_{cr}/c = 0.895058$ and $\bar{P}_e = 0.318305$ using Eqs. (26) and (27), respectively. If these values are substituted in Eqs. (19)-(22) the dimensionless integration constants are obtained as $\bar{C}_1 = C_1/c^3 = 3.93047 \times 10^{-4}$, $\bar{C}_2 = C_2 = 2.99591 \times 10^{-4}$, $\bar{C}_3 = C_3/c^3 = 4.60965 \times 10^{-4}$ and $\bar{C}_4 = C_4 = 2.04873 \times 10^{-4}$. The corresponding stresses and displacement are plotted against the nondimensional radial coordinate in Figure 3(a). The radial stress and displacement are continuous at the interface satisfying interface conditions, but since the layers are made of different materials the tangential stress is discontinuous. It is also shown in this figure that the stress component σ_θ is tensile whereas σ_r is compressive. By following the variation of the

nondimensional stress variable λ_Y in Figure 3(a), it is seen that yielding commences simultaneously at the inner surfaces of both layers. For the same assembly, assigning the interface radius $\bar{b} = 0.85 < \bar{b}_{cr}$ and using Eq.(27), the elastic limit internal pressure is obtained as $\bar{P}_e = 0.235399$. The corresponding integration constants are $\bar{C}_1 = 3.30663 \times 10^{-4}$, $\bar{C}_2 = 2.79891 \times 10^{-4}$, $\bar{C}_3 = 3.94795 \times 10^{-4}$ and $\bar{C}_4 = 1.75464 \times 10^{-4}$. The distribution of stresses and displacement in the spherical pressure vessel is given in Figure 3(b). It is seen in this figure that yielding commences at the interface of the two layers since $\lambda_Y(b) = 1$. For $\bar{b} = 0.95 > \bar{b}_{cr}$, Eq. (29) gives $\bar{P}_e = 0.356688$ and from Eqs. (19)-(22) $\bar{C}_1 = 3.93047 \times 10^{-4}$, $\bar{C}_2 = 2.66582 \times 10^{-4}$, $\bar{C}_3 = 4.50096 \times 10^{-4}$ and $\bar{C}_4 = 2.00043 \times 10^{-4}$ are obtained. As a result, the profiles for the stresses and displacement shown in Figure 3(c) are drawn. Since $\lambda_Y(a) = 1$, yielding first begins at the inner surface of the assembly. Finally, the variation of the elastic limit internal pressure \bar{P}_e with the interface radius \bar{b} for steel-aluminum assembly of inner radius $\bar{a} = 0.75$ is plotted in Figure 4. Here, $\bar{b} = \bar{a} = 0.75$ implies a single aluminum spherical pressure vessel under internal pressure and the turning point of the curve corresponds to $\bar{b} = \bar{b}_{cr}$.

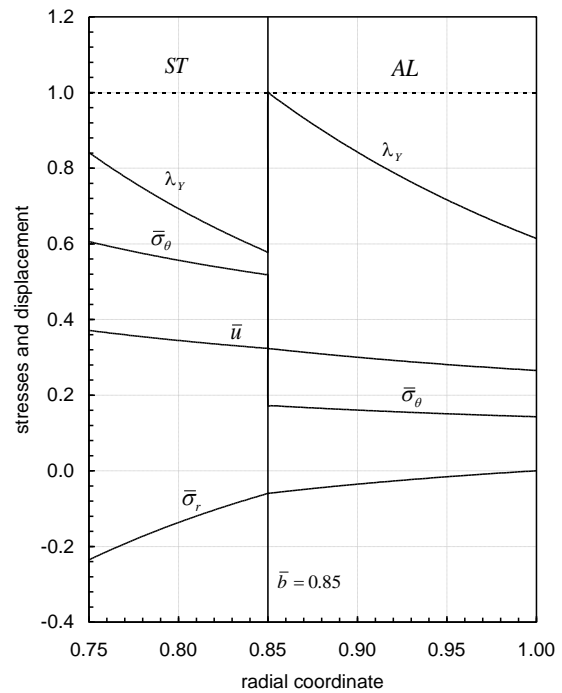


Figure 3(b). Stresses and displacement in a steel-aluminum spherical pressure vessel of inner radius $\bar{a} = 0.75$ subject to internal pressure at elastic limit internal pressure for $\bar{b} = 0.85$, $\bar{P}_e = 0.235399$

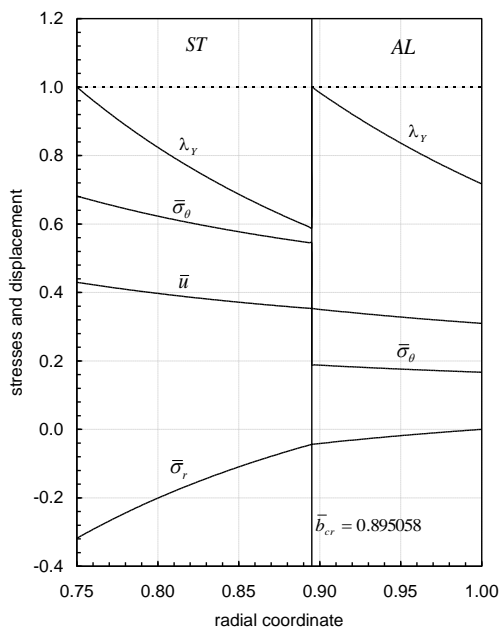


Figure 3(a). Stresses and displacement in a steel-aluminum spherical pressure vessel of inner radius $\bar{a} = 0.75$ subject to internal pressure at elastic limit internal pressure for $\bar{b} = \bar{b}_{cr} = 0.895058$ and $\bar{P}_e = 0.318305$.

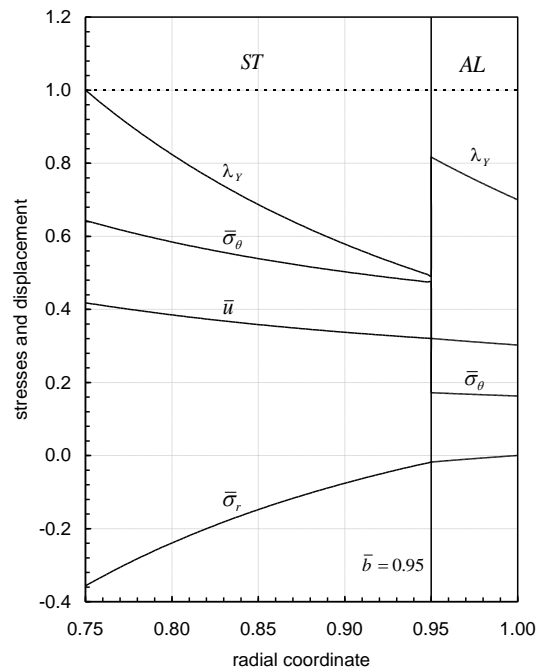


Figure 3(c). Stresses and displacement in a steel-aluminum spherical pressure vessel of inner radius $\bar{a} = 0.75$ subject to internal pressure at elastic limit internal pressure for $\bar{b} = 0.95$, $\bar{P}_e = 0.356688$.

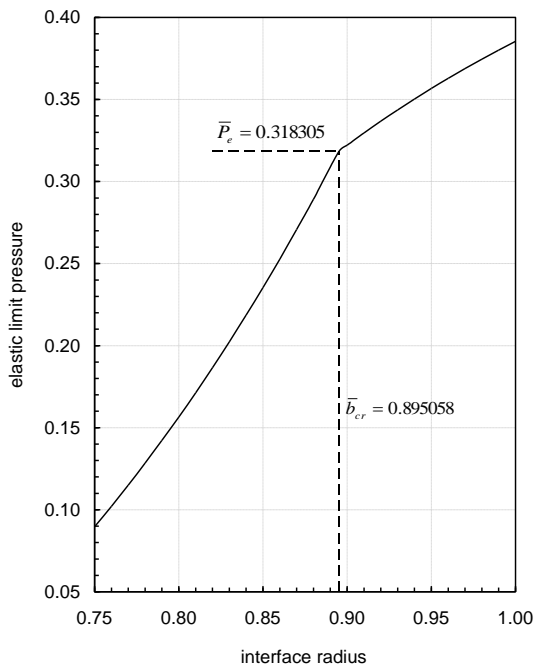


Figure 4. Variation of elastic limit internal pressure with interface radius.

3.2 Assembly Subject to External Pressure

In order to express the response of the two-layer spherical pressure vessels under external pressure, a steel-aluminum assembly is considered again. The inner radius is taken as $\bar{a} = 0.7$ and with the help of Eq. (34) the critical interface radius for this system is calculated as $\bar{b}_{cr} = 0.776302$. Using Eq. (35) for cases $\bar{b} < \bar{b}_{cr}$ and $\bar{b} = \bar{b}_{cr}$ and Eq. (36) for $\bar{b} > \bar{b}_{cr}$ and Eqs. (30)-(33) for all, calculations are performed for three different interface radii and the results are summarized in Table 1.

Table 1. Results of calculations for $\bar{a} = 0.7$

	$\bar{b} = 0.75$	$\bar{b}_{cr} = 0.776302$	$\bar{b} = 0.8$
\bar{P}_e	0.194742	0.260397	0.284579
\bar{C}_1	-2.69487×10^{-4}	-3.19562×10^{-4}	-3.19562×10^{-4}
\bar{C}_2	-4.83492×10^{-4}	-5.73333×10^{-4}	-5.73333×10^{-4}
\bar{C}_3	-2.71205×10^{-4}	-3.00751×10^{-4}	-2.80717×10^{-4}
\bar{C}_4	-4.79418×10^{-4}	-6.13541×10^{-4}	-6.49202×10^{-4}

The stresses and displacement corresponding to $\bar{b} = 0.75$, $\bar{b} = \bar{b}_{cr} = 0.776302$ and $\bar{b} = 0.8$ at their elastic limit external pressures are calculated and plotted in Figures 5(a), (b) and (c), respectively. As seen in these figures, both stress components are compressive. Furthermore, yielding commences in the assembly of interface radius $\bar{b} = 0.75$ in the outer layer (Figure 5(a)), simultaneously in both layers for $\bar{b} = \bar{b}_{cr} = 0.776302$

(Figure 5(b)) and in the inner layer for $\bar{b} = 0.8$ (Figure 5(c)). Finally, the variation of elastic limit external pressure \bar{P}_e with the interface radius \bar{b} can be seen in Figure 6.

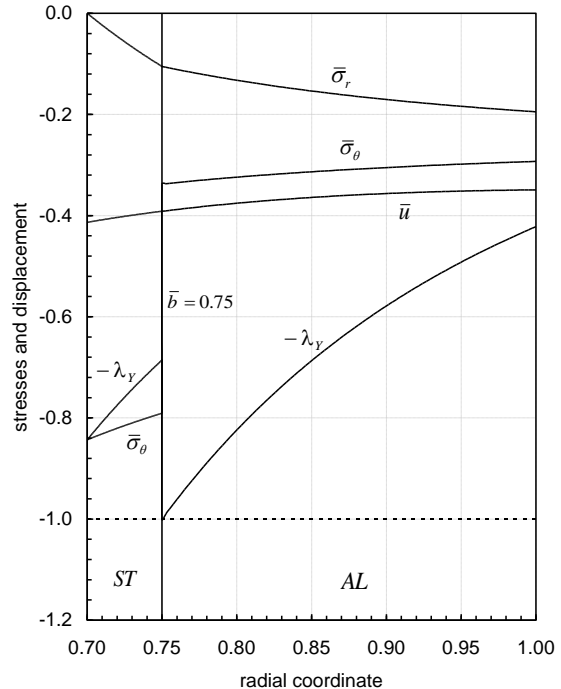


Figure 5(a). Stresses and displacement in a steel-aluminum spherical pressure vessel of inner radius $\bar{a} = 0.7$ subject to external pressure at elastic limit external pressure for $\bar{b} = 0.75$, $\bar{P}_e = 0.194742$.

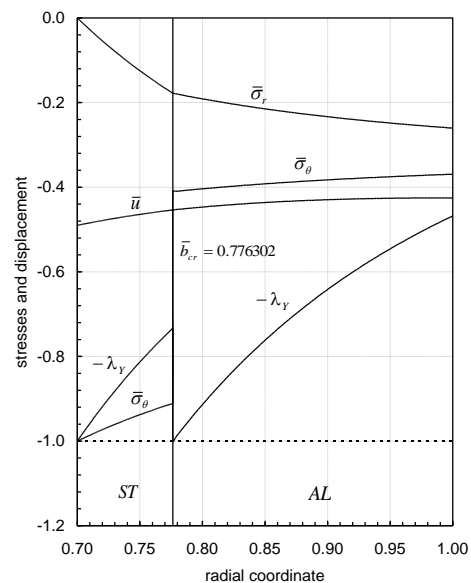


Figure 5(b). Stresses and displacement in a steel-aluminum spherical pressure vessel of inner radius $\bar{a} = 0.7$ subject to external pressure at elastic limit external pressure for $\bar{b} = \bar{b}_{cr} = 0.776302$, $\bar{P}_e = 0.260397$.

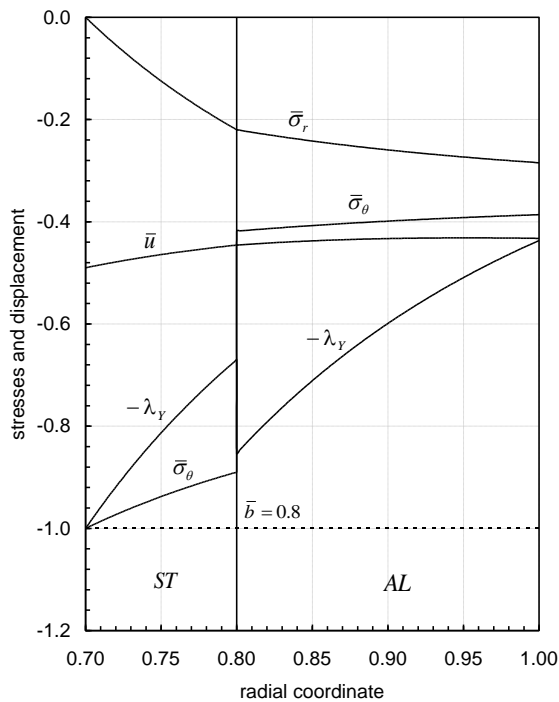


Figure 5(c). Stresses and displacement in a steel-aluminum spherical pressure vessel of inner radius $\bar{a} = 0.7$ subject to external pressure at elastic limit external pressure for $\bar{b} = 0.8$, $\bar{P}_e = 0.284579$.

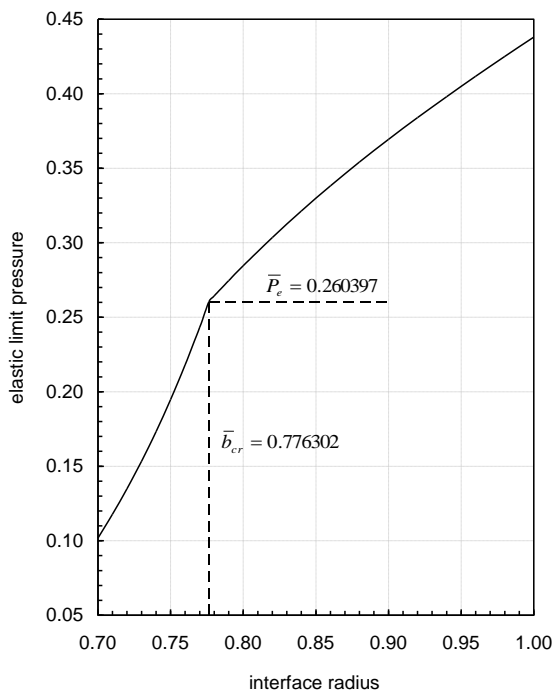


Figure 6. Variation of elastic limit external pressure with interface radius.

4. CONCLUDING REMARKS

In the framework of small deformation theory and von Mises yield criterion, an engineering stress analysis is

performed in this study concerning the yielding of two-layer spherical pressure vessels under pressure. In a single layer spherical pressure vessel, the inner surface is critical regardless of internal or external pressure is applied and yielding commences at this location when the pressure reaches its elastic limit. However, in two-layer composite spherical pressure vessels, depending on the material properties and interface radius, yielding may begin in the inner layer or in the outer layer or simultaneously in both layers. A critical interface radius \bar{b}_{cr} leading to plastic flow simultaneously in both layers may be found. The existence of \bar{b}_{cr} mainly depends on the material properties of the layers. The plastic flow starts from the inner layer at $r = a$ if $b > \bar{b}_{cr}$, it yields in the outer layer at the interface otherwise. In case \bar{b}_{cr} does not exist, the assembly behaves like a single layer spherical pressure vessel.

LIST OF SYMBOLS

- a, b, c inner, interface and outer radii of the spherical pressure vessel assembly, respectively
- C_i integration constants
- E modulus of elasticity
- P pressure
- r, θ, ϕ spherical coordinates
- S_{ij} deviatoric stress tensor
- u radial displacement
- ϵ_i strain components
- ν Poisson's ratio
- σ_i stress components
- σ_0, σ_Y initial and subsequent yield stress
- $\bar{\sigma}$ deviatoric stress
- λ_Y nondimensional stress variable

REFERENCES

1. Timoshenko S.P., Goodier J.N., "Theory of Elasticity", 3rd ed., **McGraw-Hill**, New York, (1970).
2. Mendelson A., "Plasticity: Theory and Application", **Macmillan**, New York, (1968).
3. Noda N., Hetnarski R.B., Tanigawa Y., "Thermal Stresses", 2nd ed., **Taylor and Francis**, New York, (2003).
4. Jiang W., "Hollow spheres subjected to sustained and variable loads", **Journal of Engineering Mechanics-ASCE**, 120: 1343-1368, (1994).
5. Bifulco H., "The arbitrarily and periodically laminated elastic hollow sphere: Exact solutions and homogenization", **Archive of Applied Mechanics**, 68: 579-588, (1998).

6. Guven U., "On stress distributions in functionally graded isotropic spheres subjected to internal pressure", *Mechanics Research Communications*, 28: 277-281, (2001).
7. You L.H., Zhang J.J., You X.Y., "Elastic analysis of internally pressurized thick-walled spherical pressure vessels of functionally graded materials", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82: 347-354, (2005).
8. Eslami M.R., Babaei M.H., Poultangari R., "Thermal and mechanical stresses in a functionally graded thick sphere", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82: 522-527, (2005).
9. Chen Y.Z., Lin X.Y., "Elastic analysis for thick cylinders and spherical pressure vessels made of functionally graded materials", *Computational Materials Science*, 44: 581-587, (2008).
10. Fukui Y., Yamanaka N., "Elastic analysis for thick-walled tubes of functionally graded material subjected to internal pressure", *The Japan Society of Mechanical Engineers*, 35: 379-385, (1992).
11. Horgan C.O., Chen A.M., "The pressurized hollow cylinder or disk problem for functionally graded isotropic linearly elastic materials", *Journal of Elasticity*, 55: 43-59, (1999).
12. Tutuncu N., "Stress in thick-walled FGM cylinders with exponentially-varying properties", *Engineering Structures*, 29: 2032-2035, (2007).
13. Akis T., "Elastoplastic analysis of functionally graded spherical pressure vessels", *Computational Materials Science*, 46: 545-554, (2009).
14. Eraslan A.N., Akis T., "Plane strain analytical solutions for a functionally graded elastic-plastic pressurized tube", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 83: 635-644, (2006).
15. Jahromi B.H., Farrahi G.H., Maleki M., Hashemi H.N., Vaziri A., "Residual stresses in autofrettaged vessel made of functionally graded material", *Engineering Structures*, 31: 2930-2935, (2009).
16. Jahromi B.H., Ajdari A., Hashemi H.N., Vaziri A., "Autofrettage of layered functionally graded metal-ceramic composite vessels", *Composite Structures*, 92: 1812-1822, (2010).
17. Jabbari M., Sohrabpour S., Eslami M.R., "Mechanical and thermal stress in a functionally graded hollow cylinder due to radially symmetric loads", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 79: 493-497, (2002).
18. Eraslan A.N., "Stresses in FGM pressure tubes under non-uniform temperature distribution", *Structural Engineering and Mechanics*, 26: 393-408, (2007).
19. Eraslan A.N., Akis T., "Deformation analysis of elastic-plastic two layer tubes subjected to pressure: An analytical approach", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 28: 261-268, (2004).
20. Eraslan A.N., Akis T., "Yielding of two-layered shrink-fitted composite tubes subjected to radial pressure", *Forschung im Ingenieurwesen*, 69: 187-196, (2005).
21. Eraslan A.N., Akis T., "Stress analysis in strain hardening two-layer composite tubes subject to cyclic loading of internal pressure", *International Journal of Advances in Applied Mathematics and Mechanics*, 3: 65-76, (2015).
22. Eraslan A.N., Akis T., Akis E., "Deformation analysis of two-layer composite tubes under cyclic loading of external pressure", *Journal of Basic and Applied Research International*, 13: 107-119, (2016).
23. Ghannad M., Zamaninejad M., "Complete closed-form solution for pressurized heterogeneous thick spherical shells", *Mechanika*, 18: 508-516, (2012).
24. Sonachalam M., Ranjit Babu B.G., "Optimization of composite pressure vessel", *International Journal of Science and Research*, 4: 1668-1670, (2013).
25. Prakash K.S.J., Mastanaiah T., "Industrial spherical pressure vessel design and analysis using FEA", *International Journal of Computational Engineering Research*, 4: 32-35, (2014).
26. Anani Y., Rahimi G.H., "Stress analysis of thick pressure vessels composed of functionally graded incompressible hyperelastic materials", *International Journal of Mechanical Sciences*, 104: 1-7, (2015).
27. Hill R., "The Mathematical Theory of Plasticity", *Clarendon Press*, Oxford, (1950).

Mantolama Yöntemiyle Güçlendirilmiş Betonarme Kolonların Akustik Emisyon Yöntemiyle Analizi

Anıl ÖZDEMİR^{1*}, Emre ERCAN^{2*}

^{1*} Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

^{2*} Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

(Geliş/Received : 22.09.2016 ; Kabul/Accepted : 09.11.2016)

ÖZ

Akustik Emisyon (AE), gerilme altındaki malzemelerin hızla enerji salarak geçici elastik dalgalar ürettiği olaylar ve bu şekilde oluşan geçici elastik dalgalar olarak tanımlanır. Bu çalışmada, betonarme mantolama yöntemiyle güçlendirilmiş kolonların analizi akustik emisyon tekniği ile deneysel olarak araştırılmıştır. Yük taşıyamaz halde bulunan 25x25x195 cm boyutlarındaki betonarme kolonlar mantolama yöntemiyle güçlendirilmiştir. Bu bağlamda, referans kolondan farklı olarak betonarme kolonlara iki farklı türde güçlendirme stratejisi uygulanmıştır. Birinci kolon (referans kolon); boyuna donatıları süreksiz ve ankrajsız olarak üretilmiştir. İkinci kolon, kayma donatılı (ankrajlı), boyuna donatıları süreksiz olacak şekilde imal edilmiştir. İkinci kolondan farklı olarak; üçüncü kolonda boyuna donatılar sürekli olacak şekilde donatılandırma yapılmıştır. Ardından numuneler tersinir tekrarlı yük altında göçmeye maruz bırakılmıştır. Bu deneysel çalışmanın sonucunda, deney elemanlarının akustik emisyon ile analizleri karşılaştırılmış, yorumlanmış ve bazı önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Akustik Emisyon Yöntemi, Betonarme Mantolama, Güçlendirme.

Acoustic Emission Analysis Method of Reinforced Concrete Column with the Jacketing Methods

ABSTRACT

Acoustic Emission (AE) is defined as a phenomenon, materials which are under stress, are emitting energy and producing temporary elastic waves. In this paper, analysis of the reinforced concrete columns jacketing method was experimentally investigated by acoustic emission technique. Non-load-bearing reinforced concrete columns with dimensions of 25x25x195 cm were reinforced with the jacketing method. With this regard, two different types of retrofitting strategies were applied to RC columns and were validated via the results of a reference column. The first column has impermanent vertical reinforcement and no anchors. Second column is designed as shear reinforcement (anchors), impermanent vertical reinforcement. As a difference from the second column in the third column vertical reinforcements are permanent. Then, the specimens under reversible cyclic loads have been subjected to failure. Result from this experimental work, the acoustic emission analysis of specimens are compared, commented and recommendations are made accordingly.

Keywords: Acoustic Emission Method, R.C. Jacketing, Strengthening.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Katı bir malzemeye artan bir gerilme uygulandığında, öncelikle plastik deformasyon ardından da kırılma meydana gelmesi kaçınılmazdır. Bu süreç esnasında, biriken uzama enerjisi aralıklarla serbest kalmakta ve geçici elastik dalgalar üretmektedir. Bu şekilde oluşan geçici elastik dalgalar, akustik emisyon (AE) olarak tanımlanır [1,2].

AE yöntemi temel olarak bakıldığında yapılar üzerinde yapılan tahribatsız bir muayene türüdür. Modern AE araştırma çalışmaları, malzemelerden insan kulağı frekansı dışındaki (ultrasonik) frekanslarda yayılan seslerle ilgilidir.

Malzemelere belli bir yük etkimesi durumunda, çatlak başlangıçları, ikizleme ve dislokasyon hareketleri, kristal

düzlemlerinin kayması, martensitik faz dönüşümleri gibi dinamik hareketler temel AE kaynakları olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca oksit tabakasının çatlaması gibi çeşitli yüzey etkileri de AE kaynağı olarak tanımlanmaktadır. AE muayene yöntemi ile metal ve seramiklerde çatlak başlangıcı, yorulma çatlakları ilerlemesi, gerilmeli korozyon çatlaklarının saptanması, faz dönüşümleri ve dislokasyon hareketleri gibi çeşitli olaylar incelenebilmektedir [3].

M. A. A. Aldahdooh ve ekibi tarafından yapılan çalışmada; dört noktadan eğilme etkisi altında bulunan betonarme kirişin, kiriş kalınlığının hasar mekanizması üzerindeki etkilerini test etmek için AE'nin uygulanabilirliği araştırılmıştır [4]. Hasar seviyesinin artışı sonucunda, ortalama frekans dışında tüm AE parametrelerinin değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca tüm AE parametreleri ortalama frekans da dahil olmak üzere kiriş kalınlığıyla artmıştır. Böylelikle, bu çalışmada betonarme kirişin

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

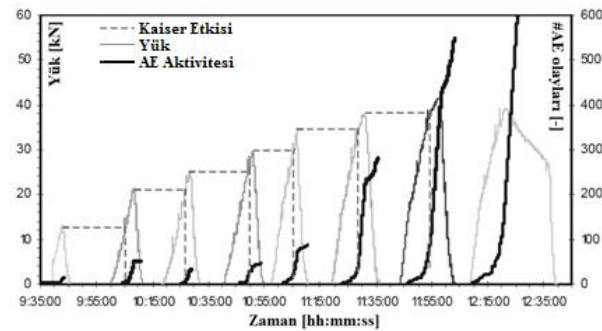
e-posta: anilozdemir@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 17-23

kalınlık değerleriyle birlikte davranışının izlenmesinde AE'nin etkin olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir.

Pierre Rossi ve ekibi, betonun temel sünmesiyle ilişkili çalışmak ve konuyla ilgili fiziksel temelli nümerik modeller geliştirmek için bir araştırma projesi başlatmıştır [5]. Bu bağlamda, deneysel bir çalışma yapılmış ve bu sünme davranışında aynı beton için farklı bakış açıları gözlenmiştir. Bu deneysel çalışmalar betonun temel sünmesinin kökeninde fiziksel mekanizmalara ilişkin bir varsayım önermesini sağlamaktadır. Bu varsayım sünme adımları (sabit yüke maruz kalmış sünme testi adımları sırasında) esasındaki mikro çatlakların bazı ek kuruma büzülmelerine sebep olan su transferleriyle oluşumudur.

T. Kaiser'in yaptığı bilimsel çalışmaların yayınlanmasına kadar olan süreç, AE yönteminin ilk evresi olarak bilinir. Kaiser, yükleme altında malzemelerden üretilen sesleri belirlemek ve AE sinyallerini kaydetmek için malzemeleri çekme testine tabi tutmuştur. Çeşitli gerilmeler altında, bu malzemelerin gerilme-deformasyon davranışı ve frekansları incelenmiştir. Çalışmalarının sonunda "kaiser etkisi" olarak açıklanan tersinirsizlik olgusunu keşfetmiştir [6]. Kaiser etkisi, yükleme altındaki bir malzemenin sadece birincil yük seviyesi aşıldıktan sonra ses dalgalarını yayması ile açıklanır. Diğer bir ifadeyle, önceki maksimum gerilme düzeyine ulaşmadan önce az sayıda ya da sıfır AE kaydı gerçekleşirken, bu gerilme düzeyi aşıldığında AE sayısında ciddi bir artış söz konusudur [7]. Kaiser etkisi Şekil 1'de bir deneyden alıntı yapılarak gösterilmiştir. Deneyde bir küp numune sıkıştırılmaya tabi tutulmuş ve tekrarlı yükleme altında test edilmiştir. Şekil zamana karşı AE aktivitesini ve yükleme seviyesini göstermektedir.



Şekil 1. Tekrarlı yükleme altında beton numunede oluşan Kaiser Etkisine örnek (Example for the Kaiser effect occurring in the concrete sample under loading) [8]

Barbara Goszczynska'nın çalışmasında, betonda ve betonarme kirişlerde oluşan çatlakların başlaması ve büyümesi AE ile analiz edilmiştir [9]. Bu yöntemde, her aktif yıkıcı işlemin AE kaynağı olabileceği fikri esas alınarak yapılmıştır. Önceden oluşturulmuş bir veri tabanındaki AE sinyalleri ile yapıya yük uygulanması sırasında oluşan AE sinyalleri karşılaştırıldığında, bir elemanda oluşan aktif bozunmaların oluşumu tespit edilebilmiştir. Deneysel çalışmada AE yönteminin kullanılmasıyla yapı elemanının içinde ve yüzeyinde

görülemeyecek kadar küçük olan mikro çatlakların ve görülebilen makro çatlakların belirlenmesinin (yerlerinin tespit edilmesi) mümkün olduğu sonucuna varılmıştır.

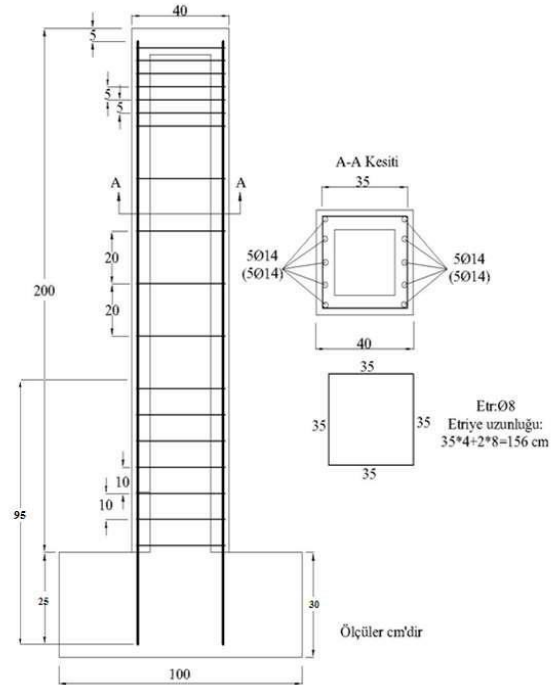
Bu çalışmada, daha önce nihai taşıma kapasitesine ulaşana kadar yüklemeye maruz bırakılmış ve kullanılamaz halde olan 25x25x195 cm ebatlarındaki üç betonarme kolon kullanılmıştır. Bu üç betonarme kolon, mantolama yöntemiyle 40x40x200 cm ebatlarına getirilerek güçlendirilmiş ve tersinir tekrarlı yükleme uygulanmıştır. Ayrıca tersinir tekrarlı yükleme altındaki davranışı AE yöntemiyle araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Deney Elemanlarının Adlandırılması (Naming Elements Test)

Referans elemandan farklı olarak, deney elemanlarından biri kayma donatısı eklenerek mantolama yapılmıştır. Diğer deney elemanına ise kayma donatısı eklenerek ve boyuna donatı sürekli olacak şekilde mantolama yapılmıştır [10]. Deney elemanlarına ilişkin isimlendirme ve kısaltma detayları aşağıda verilmiştir.

- FVB: Filizli, Kendiliğinden yerleşen beton (Referans Eleman).
- KDFVB: Kayma donatılı, Filizli, Kendiliğinden yerleşen beton.
- KDSVB: Kayma donatılı, Sürekli, Kendiliğinden yerleşen beton.

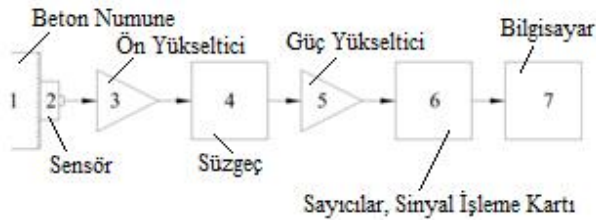


Şekil 2. FVB deney elemanının şematik görünümü ve donatı planı (Schematic display and reinforcement plan of FVB experiment element)

AE sistemi her deney öncesinde kalibre edilmiştir. Kurulum ve kalibrasyon için için şu adımlar izlenmiştir;

- Sensörlerin yerleştirileceği yerler zımparalanmış, işaretlenmiş ve numaralandırılmıştır.
- 150 kHz frekansa sahip AE Sensörlerinin, seramik yüzeylerine iletken malzeme sürülüp beton yüzeyine teması sağlanmıştır.
- Ön yükselticiler 40 dB single giriş modunda kullanılmıştır. Her bir sensörün çalışıp çalışmadığını kontrol etmek, sistemde herhangi bir sorunun olup olmadığını anlamak amacıyla her bir sensöre yakın noktalarda, kurşun uçlu kalem ile yüzey 45° açı yapacak şekilde uç kırılmıştır. Uç kırma işlemi istenilen frekans kalitesine ulaşana kadar tekrarlanmıştır.

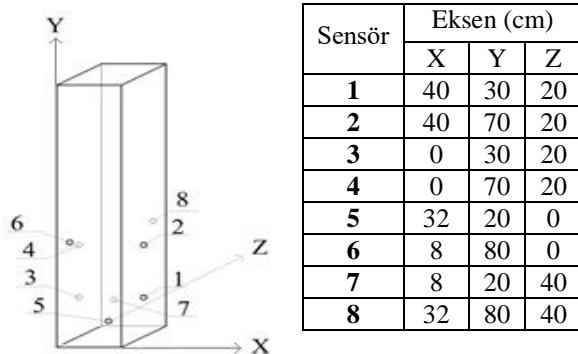
AE sistemini oluşturan donanımlar basitleştirilmiş gösterimle Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. AE izleme sisteminin blok şeması (Block scheme of four-channel AE testing system)

AE sisteminin özelliklerinden birisi de arka plan gürültüsünü elimine ederek AE sinyallerini veri setlerine dönüştürmesidir. Bu amaçla modern AE sistemlerinde eşik seviyeleri (thresholds) kullanılmaktadır. Eğer bir AE sinyali pozitif veya negatif yönde eşik değerini aşarsa, tespit edilen bu sinyal bir AE vuruşu olarak kaydedilir [12]. Bu çalışmada ise arka plan gürültüsünü engellemek için eşik seviyesi belirlenmiştir. Eşik seviyesine ek olarak, tespit edilen bir vuruşun en az üç sensör tarafından algılanması şartı yazılım ile ayarlanmıştır.

Deney elemanları üzerine yerleştirilen AE sensörlerinin düzeni ve koordinatları Şekil 7'de ve yerleşimi ise Şekil 8'de gösterilmiştir. Deneyde kullanılan tüm elemanlar için aynı koordinatlar kullanılmıştır.



Şekil 7. AE sensörlerinin düzeni ve koordinatları (The order and coordinates of AE sensors)



Şekil 8. AE sensörlerinin yerleşimi (The layout of the AE sensors)

2.4. Malzeme (Material)

2.4.1. Beton (Concrete)

Güçlendirilecek olan mevcut betonarme kolonların daha önceki beton dayanımları 20 MPa seviyesindedir. Manto katmanında kullanılan beton karışımı olarak "Kendiliğinden Yerleşen Beton" kullanılmıştır. Manto katmanının betonları dökülürken her beton karışımından en az iki adet küp numune alınmasına gayret edilmiştir. Küp numuneler, 28 günlük mukavemetini aldıktan sonra beton presinde kırılmıştır. Numunelere ait hesaplanmış basınç dayanımları Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Deney elemanlarının beton basınç dayanımları (Concrete compression strengths of the experiment elements)

Eleman Adı	Beton Tasarım Sınıfı	Manto Katmanı Ortalama (MPa)	Mevcut Kolon (MPa)
FVB	C35	44,32	20,47
KDFVB		47,19	18,52
KDSVB		46,13	19,40

2.4.2. Çelik donatı (Reinforcement)

Bütün deney elemanlarında nervürlü S420 (BÇ III) çelik donatı kullanılmıştır. Deney elemanlarının yapımında, boyuna donatı olarak Ø14 kullanılmıştır. Etriye olarak da Ø8'lik donatı kullanılmıştır. Etriyeler fabrikasyon olarak üretilmiştir. Deney elemanlarının tümünde aynı donatılar kullanılmıştır. Kullanılan bu donatılardan yeterli sayıda numune alınarak ortalama akma dayanımları belirlenmiştir. Dayanım sonuçları Çizelge 2'de görülmektedir.

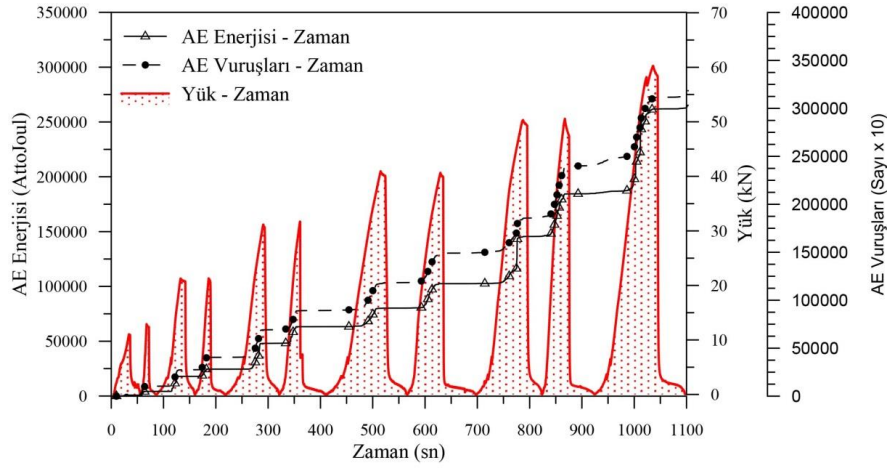
Çizelge 2. Çelik donatıların akma ve çekme dayanımları (Yield and tensile strengths of the steel bars)

Donatı Çapı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)
Ø8	441	565
Ø14	459	572

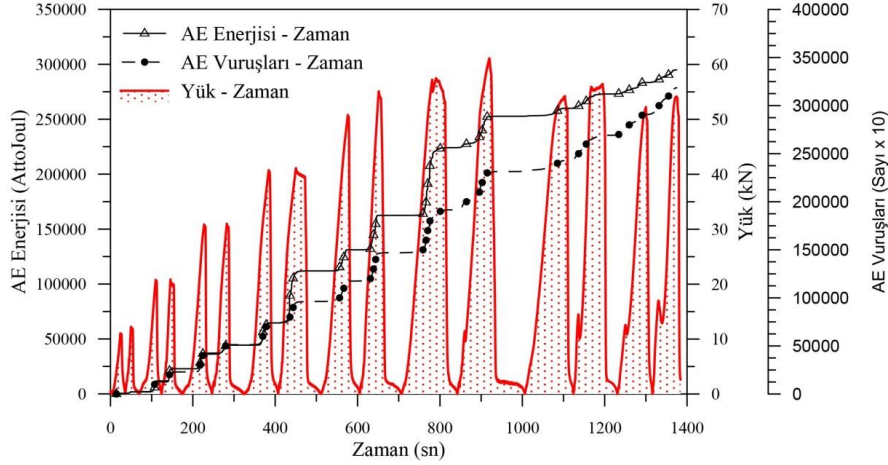
3. DENEY SONUÇLARI (TEST RESULTS)

Gerçekleştirilen deneyle, zamana karşı etkiyen kesme kuvveti, toplam AE vuruşu ve AE enerjisi değerleri eş

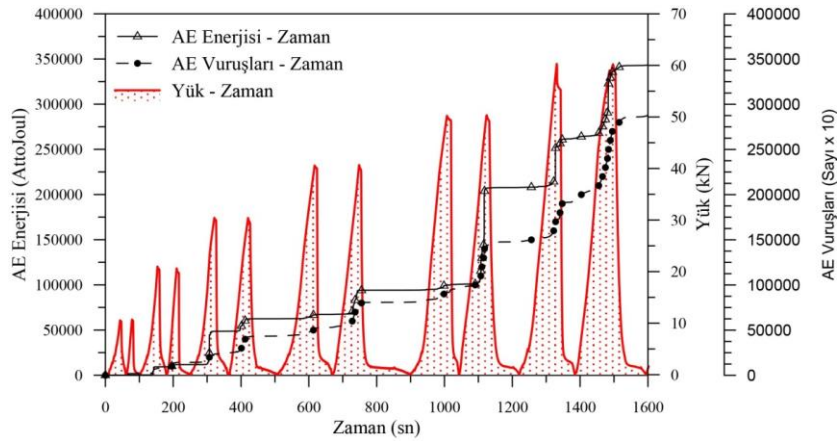
Değerlendirme aşamasında, yüklemelere karşılık gelen AE enerjisi ve AE vuruşunun seviyeleri karşılaştırılmıştır. Tüm numunelere ilk önce itme yükü ardından



Şekil 9. FVB deney elemanının AE vuruş ve AE enerji grafiği (AE stroke and AE energy graphics of FVB experiment element)



Şekil 10. KDFVB deney elemanının AE vuruş ve AE enerji grafiği (AE stroke and AE energy graphics of KDFVB experiment element)



Şekil 11. KDSVB deney elemanının AE vuruş ve AE enerji grafiği (AE stroke and AE energy graphics of KDSVB experiment element)

zamanlı olarak test sırasında elde edilmiştir. Elde edilen veriler Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de sunulmuştur. Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de X-ekseni zamanı ve Y-ekseni sırasıyla AE enerjisi, yük ve AE vuruş değerlerini göstermektedir.

çekme yükü uygulanmış ve yüklemeler aynı sırayla devam ettirilmiştir. Deney esnasında uygulanan itme ve çekme yük değerleri Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de pozitif (+) olacak şekilde tekrar düzenlenmiştir. Böylece

aynı yük seviyesindeki AE verilerini okumak çok daha kolaylaşmıştır.

İlk iki yüklemenin ileri ve geri çevrimlerinde tüm numunelerde AE aktivitesi ve AE enerjisi değerlerinin ayırt edilemeyecek düzeyde düşük olduğu saptanmıştır. Bunun nedeni ise uygulanan yük değerinin mikro çatlak açma kapasitesinde bile olmadığını göstermektedir.

FVB elemanında, önceki çevrimlere göre 4'üncü yüklemenin geri çevrimi ve 5'inci yüklemenin ileri çevriminde AE aktivitesinde artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi deney elemanında yeni çatlakların ilerlemesi/gelişmesi ve yükleme eksenine küçük açılarda konumlanmış çatlakların açılması ile ilgilidir. 5'inci yüklemenin geri çevrimi ve 6'ıncı yüklemenin ileri çevriminde ise deney elemanı eğilme dayanımı kapasitesine yaklaşmış ve AE aktivitesinde çok hızlı bir yükseliş göstermesine neden olmuştur. Ayrıca çatlaklar arası etkileşim artmaya başlamıştır. Kolonun rijitliğinin azalmaya başladığı bu yüklemelerde AE enerjisi ve AE vuruş sayısında ani artışlar kaydedilmiştir.

KDFVB elemanında, önceki çevrimlere göre 4 ve 5'inci yüklemelerin ileri ve geri çevriminde AE aktivitesinde artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi deney elemanında yeni çatlakların ilerlemesi/gelişmesi ve yükleme eksenine küçük açılarda konumlanmış çatlakların açılması ile ilgilidir. AE enerjisi özellikle 4 ve 5'inci yüklemelerin ileri ve geri çevriminde AE aktivitesiyle paralel olmaktan çıkarak ani sıçramalar yapmıştır ve sonraki yükleme adımlarında aynı davranışı sergilemeye devam etmiştir. 6'ıncı yüklemenin ileri ve geri çevrim esnasında ise deney elemanı eğilme dayanımı kapasitesine yaklaşmış ve AE aktivitesinde çok hızlı bir yükseliş göstermesine neden olmuştur. AE enerjisindeki ve AE vuruşundaki ani artışlar kolonun rijitliğinin azalmaya başlamasıyla aynı zamana denk gelmektedir. Ayrıca çatlaklar arası etkileşim artmaya başlamıştır. Sonraki yükleme adımlarında deney elemanı daha fazla yük alamadığından AE aktivitesi ve AE enerjisi daha düşük seviyede ama artışını sürdürmüştür.

KDSVB elemanında, önceki çevrimlere göre 5'inci yüklemenin geri çevriminde AE aktivitesinde artış gözlemlenmiştir. Bu artışın sebebi deney elemanında yeni çatlakların ilerlemesi/gelişmesi ve yükleme eksenine küçük açılarda konumlanmış çatlakların açılması ile ilgilidir. AE enerjisi özellikle bu yüklemelerde AE aktivitesiyle paralel olmaktan çıkarak ani sıçramalar yapmıştır ve sonraki yüklemelerde aynı davranışı sergilemeye devam etmiştir. Kolonun rijitliğinin azalmaya başladığı bu yüklemelerde AE enerjisi ve AE vuruş sayısındaki ani artış kaydedilmiştir. 6'ıncı yüklemenin ileri ve geri çevriminde ise deney elemanı eğilme dayanımı kapasitesine yaklaşmış ve AE aktivitesinde çok hızlı bir yükseliş göstermesine neden olmuştur. Ayrıca çatlaklar arası etkileşim artmaya başlamıştır.

3. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Deney elemanlarına yükleme yaparak AE deneyi yapılması sürecinde yüklemenin artması ile AE aktivitesinin sürekli artan bir davranış içinde olduğu bilinmektedir. Deney numunelerinden elde edilen veriler de bu doğrultuda gerçekleşmiştir. Ayrıca yükün artmasıyla birlikte algılanan sinyallerin genlik değerleri de artmaktadır.

Eğilme dayanımlarına ulaştıktan sonraki yükleme adımlarında deney elemanları daha fazla yük alamadığından AE aktivitesi ve AE enerjisi daha düşük seviyede artışını sürdürmüştür. Bunun nedeni ise elemanın kesmeden değil eğilmeden geçmesidir. Ayrıca deney elemanlarında çatlak oluşumu görülmemesi de bundan olduğu söylenebilir.

6'ıncı yüklemenin ileri çevrimi esnasında, Referans numune (FVB) ile KDFVB ve KDSVB elemanları karşılaştırıldığında sırasıyla %4,54 düşük ve %2,8 yüksek AE aktivitesi kaydedilmiştir. Bu veriler deney numunelerinin alabildiği yük ile birebir ilişki göstermiştir. Referans numuneye göre 6'ıncı yükleme esnasında sırasıyla %5,33 düşük ve %0,9 yüksek yük seviyesine ulaşmıştır. Deney numunelerindeki boyuna donatıların filizli ya da sürekli olması akma dayanımına çok fazla etkisi olmamıştır.

Deney numunelerinde kayma donatısı olup olmamasının akma dayanımına etkisinde çok net bir ayrım görülmemiştir. Manto katmanı ile çekirdek arasından hiç AE verisi alınmamıştır. Bunun nedeni olarak; kayma donatısının, çekirdek betonu ile manto betonu arasındaki aderansı oldukça artırdığı söylenebilir.

AE analizinin en önemli avantajlarından birisi de çatlak ve kırılma mekanizmalarının incelenmesine olanak vermesidir. Gerekli yazılım ile numune içinde oluşan çatlağın sınıflandırılması yapılabilmektedir. Bu deney esnasında çok az miktarda çatlak oluşmasından dolayı çatlak sınıflandırması ve kaynak lokasyonu belirlenememiştir.

4. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Deneysel veriler Anıl ÖZDEMİR'in yüksek lisans çalışmasından alınmıştır. Deneyler Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) ASTM E1316, "Standard Terminology for NDT", (2002)
- 2) EN 1330-9, "Terms Used in AE Testing", (2000).
- 3) Tuncel, S., "Tahribatsız Muayene Teknolojilerinde Son Gelişmeler: Akustik Emisyon", *3rd International Non-Destructive Testing Symposium and Exhibition*, İstanbul, (2008).
- 4) Aldahdooh, M.A.A., Bunnori, N.M. and Johari, M.A.M., "Damage Assessment of Reinforced Concrete Beams at Different Flexural Damage Levels Using Acoustic Emission Technique", *Malaysian Construction Research Journal*, 2: 79-90, (2012).

- 5) Rossi, P., Tailhan, J.L., Maou, F.L., Gaillet, L. and Martin, E., “Basic Creep Behavior of Concretes Investigation of The Physical Mechanisms by Using Acoustic Emission”, *Cement and Concrete Research*, 42: 61–73, (2012).
- 6) Kaiser, V. J., “Knowledge and Research on Noise Measurements During The Tensile Stressing of Metals”, *Archiv für das Eisenhüttenwesen*, 24: 43-44p, (1953).
- 7) Ohtsu, M., “History and Fundamentals”, Acoustic Emission Testing: Part A, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, (2008).
- 8) Grosse, C.U. and Ohtsu, M., “Acoustic Emission Testing Basics for Research-Applications in Civil Engineering”, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, (2008).
- 9) Goszczynska, B., “Analysis of The Process of Crack Initiation and Evolution in Concrete with Acoustic Emission Testing”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 14: 134-143, (2014).
- 10) Özdemir, A., “Hasarlı Betonarme Kolonların Mantolama Yöntemiyle Güçlendirilmesi ve Akustik Emisyon Yöntemiyle Deneysel Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
- 11) NDT Resource Center, Introduction to Acoustic Emission Testing, www.nde-ed.org/index_flash.htm (Erişim tarihi: 17 Haziran 2015).
- 12) Shiotani T., “Parameter Analysis”, Acoustic Emission Testing: Part A, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, (2008).

A Parametric Study on the Heterogeneous Photo-Fenton-Like Oxidation of Bisphenol-A over an Fe/TiO₂ Catalyst under Visible Light

Meral DÜKKANCI

Ege University, Faculty of Engineering, Chemical Engineering Department, 35100, Bornova/Izmir/Turkey

(Received : 18.02.2016 ; Accepted : 03.05.2016)

ABSTRACT

In this study the oxidation of Bisphenol-A (BPA) was investigated using heterogeneous photo-Fenton-like oxidation under visible light irradiation over iron containing TiO₂ catalysts. The catalysts were prepared by the incipient wetness impregnation method with different iron contents (1 and 5 wt%) and characterized by XRD, SEM, FT-IR, nitrogen adsorption, UV-Vis DRS, and ICP-AES measurements. Among the prepared catalysts the 1 wt% iron containing the TiO₂ catalyst showed better catalytic activity (with a chemical oxygen demand (COD) reduction of 65.4% at the end of 6h of oxidation) than the other catalysts. The effects of the parameters such as the initial BPA concentration, H₂O₂ amount, catalyst amount, the pH of the initial BPA solution, and reaction temperature were studied with that catalyst on the heterogeneous photo-Fenton-like oxidation of an aqueous BPA solution. The small amount of iron that leached to the solution and the reusability of the catalyst illustrates that the process is mainly the heterogeneous photo-Fenton-like process, instead of the homogeneous photo-Fenton-like process. The degradation of BPA was described by the first order kinetics with an activation energy of 22.5 kJ/Mol.

Keywords: Photo-Fenton-like Oxidation, Bisphenol-A, Fe/TiO₂ Catalysts.

Bisfenol-A'nın Görünür Bölge Işığında ve Fe/TiO₂ Katalizörü üzerinde Heterojen Foto-Fenton-Tipi Oksidasyonu üzerine Parametrik Çalışma

ÖZ

Bu çalışmada Bisfenol-A'nın (BPA) demir içeren TiO₂ katalizörleri ve görünür bölge ışığı varlığında heterojen foto-Fenton-tipi oksidasyonu incelenmiştir. Bu bağlamda, öncelikle farklı demir miktarlarında (ağırlıkça %1 ve %5) ıslatarak emdirmeye yöntemiyle TiO₂ katalizörler hazırlanmış ve XRD, SEM, FTIR, Azot Adsorpsiyon, UV-Vis DRS ve ICP-AES teknikleri ile karakterize edilmiştir. En iyi aktivite gösteren ağırlıkça %1 demir içeren TiO₂ katalizörü ile BPA'nın heterojen foto-Fenton tipi oksidasyonunda 6 saat sonunda %65,4'lük COD (Kimyasal Oksijen İhtiyacı) giderimi elde edilmiştir. BPA'nın heterojen foto-Fenton-tipi oksidasyonuna, BPA başlangıç derişimi, H₂O₂ ve katalizör miktarları, BPA çözeltisinin başlangıç pH değeri ve reaksiyon sıcaklığının etkileri incelenmiştir. Çözeltiyeye özütlenen demir miktarının düşük olması ve katalizörün yeniden kullanılabilirliğinin yüksek olması, reaksiyonun homojen foto-Fenton-tipi oksidasyonundan ziyade heterojen foto-Fenton-tipi oksidasyonu olduğunu göstermektedir. Çalışmada BPA bozunma kinetiği de incelenmiş, bozunmanın birinci mertebeye uyduğu gözlenmiş ve aktivasyon enerjisi 22,5 kJ/Mol olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Foto-Fenton-Tipi Oksidasyon, Bisfenol-A, Fe/TiO₂ Katalizörler.

1. INTRODUCTION

Bisphenol-A (BPA) is an organic compound composed of two phenol rings connected to a poly group at the center carbon and has been widely accepted as one of the important monomers for the production of a variety of chemical materials such as polycarbonate, epoxy resins, and flame retardants. Due to an increase in the use of products based on epoxy resins and polycarbonate plastics, exposure of humans to BPA through several routes such as the environment and food has increased [1] and BPA has been frequently detected in both

industrial wastewater and drinking water sources (in the range of 0.02 - 50 ppm). BPA is known as an endocrine-disrupting compound with its estrogenic activity and toxicity to human. BPA also may play a role in thyroid hormone dysfunctions, central nervous system function disorder, and immune suppression [2]. BPA also has an acute toxicity in the range of about 1-10 µg/cm³ for a number of freshwater and marine species. Because of the above reasons, BPA must be removed from wastewater with suitable technologies. However, conventional processes for water treatment may be inefficient for the elimination of BPA totally. Therefore, several alternative processes have been proposed. Of all the methods developed so far, the Advanced Oxidation Processes (AOPs) offer several particular advantages in terms of

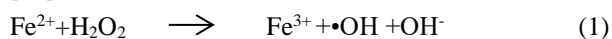
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: meral.dukkanci@ege.edu.tr

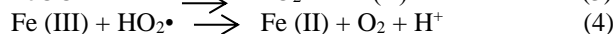
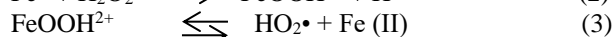
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 25-36

unselective degradation of BPA into a final mineralized form with the production of highly oxidative hydroxyl radical ($\text{OH}\cdot$) [3]. AOPs such as, sonication [1, 4-9], comparative oxidation of sonication and homogeneous Fenton reaction [10], sonoFenton reaction [11-13], photo-Fenton reaction [14], sorption on the goethite [15], photo oxidation [16, 17], photocatalytic degradation in the presence of TiO_2 catalysts [18-27], photocatalytic degradation in the presence of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{Bi}_2\text{WO}_6/\text{CoFe}_2\text{O}_4$, Bi_2WO_6 , $\text{Bi}_{3.84}\text{W}_{0.16}\text{O}_{6.24}$, and Ag_3PO_4 catalysts [28-32], photo-Fenton like oxidation over Au/C catalyst [33], ozone+UV oxidation [34], ozonation [35, 36], sonophotocatalytic oxidation [37, 38], homogeneous Fenton oxidation [39], oxidation over a $\text{SrFeO}_{3-\delta}$ perovskite catalyst in the dark [40], and H_2O_2 -assisted photoelectrocatalytic oxidation [41] were used individually or in combination with each other to degrade BPA containing wastewater. C-N co-doped TiO_2 , Bi_2WO_6 , magnetic $\text{BiOBr@SiO}_2@\text{Fe}_3\text{O}_4$, a graphene-oxide/ AgPO_4 composite, and a mesopolymer modified with palladium phthalocyaninesulfonate catalysts [30, 42-45] were used successfully in the photocatalytic degradation of BPA under visible light.

Among the used AOPs, the photocatalytic oxidation process has been the focus of numerous investigations in recent years. In this concern, TiO_2 has been extensively studied as a semiconductor photocatalyst because of its relatively high photocatalytic activity, chemical stability, low cost, and environmental friendliness. However TiO_2 is only active under UV light irradiation due to its large band gap energy (3.2 eV) which results in a low efficiency to make use of solar light [46, 47]. Whereas, ultraviolet light makes up only 4-5% of the solar spectrum, and approximately 40% of the solar photons are in the visible region. Therefore, in order to enhance the solar efficiency of TiO_2 under solar irradiation, significant efforts have been made in the past decades to develop TiO_2 -based photocatalysts capable of using abundant visible light in solar radiation or artificial light. Many strategies, including the surface modification, metal ion (Ce, In, Ag, etc.) doping, nonmetal ion (N, C, S etc.) doping, coupling with other narrow band-gap semiconductors etc. have been adopted to synthesize TiO_2 -based visible light activated photocatalysts. Metal ion doped TiO_2 has been widely studied due to not only the expanded spectral response but also the enhanced photocatalytic activity. Moreover, metal doping can improve the structure and morphology of a photocatalyst, decrease the probability of the charge carrier recombination, and promote the effective separation of the charge carrier. Among various dopants, the Fe^{3+} -dopant is the most frequently employed one, owing to its unique half-filled electronic configuration, which narrows the energy gap while inducing new intermediate energy levels [48]. The presence of the Fe^{3+} in the catalyst also acts as a Fenton like catalyst and helps the production of more hydroxyl radicals via reactions 1-4 [49].



Iron (III) can then react with hydrogen peroxide in the so-called Fenton-like reaction (equations 2 and 4)



This study presents the preparation and characterization of Fe containing TiO_2 catalysts and tests on their photocatalytic activities in the oxidation of Bisphenol-A (BPA) by the heterogeneous photo-Fenton-like oxidation under visible light irradiation. To the best of our knowledge, this study is first on the heterogeneous photo-Fenton like oxidation of BPA over Fe containing a TiO_2 catalyst under visible light.

2. EXPERIMENTAL STUDY

2.1 Catalyst Preparation

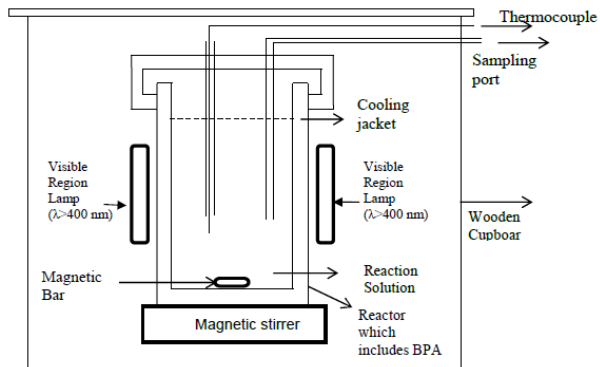
Iron containing TiO_2 catalysts were prepared by the incipient wetness impregnation method used by Arana et al. [50] and Demir et al. [51]. An aqueous solution of $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (Sigma Aldrich) was added slowly to a proper amount of TiO_2 (Sigma Aldrich P-25, 80% anatase) and the mixture was stirred vigorously for 48 h. Then, the water of the mixture was evaporated by heating at 393 K for 24 h. The catalyst was then calcined at 773 K for 3 h. The catalyst has been denoted as TiO_2 for bare TiO_2 Sigma Aldrich P-25 and x Fe/TiO_2 for the doped one, where x is the Fe weight % (wt%) in the catalyst. The x was changed to be 1 and 5.

2.2 Experimental Procedure of the Heterogeneous Photo-Fenton-like Oxidation of BPA

Figure 1 shows the experimental set-up used for the heterogeneous photo-Fenton-like oxidation of BPA. In a typical experiment, 0.3 dm^3 of 15 ppm of BPA aqueous solution was poured into the cylindrical reactor and 0.5 g/dm^3 of catalyst was added to the solution and the suspension was left for 30 minutes in the dark to establish the adsorption-desorption equilibrium of the BPA on the catalyst surface. The amount of the BPA adsorbed by the catalyst was determined by measuring the BPA concentration after 30 min in the absence of visible light illumination. Then H_2O_2 was added and the visible light lamps were turned on. The solution was irradiated with two visible lamps (high pressure Na lamps, each 150 W). The heterogeneous photo-Fenton process for the degradation of BPA took 6 h. The reaction temperature was kept constant at $293 \pm 2\text{K}$ by circulating cooling water around the reactor to avoid the significant overheating of the reaction media. The reaction vessel was maintained in a box to avoid photochemical reactions induced by natural light. Experiments were performed at a BPA ambient pH which was about 5.5 and left uncontrolled during the experiments. Samples were periodically drawn from the vessel and centrifuged for 15 min and then analyzed with a UV spectrophotometer (Shimadzu, UV-Vis 1800). The decrease in the intensity of the band at 276 nm was used as a measure of degradation degree.

In addition to these measurements, the Chemical Oxygen Demand (COD) removal of the BPA solution was

determined by measuring initial COD and final COD (at the end of the run) of the BPA solution with a COD device (Lovibond Checkit Direct COD Vario).



3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Catalyst Characterization

The Powder X-ray diffraction (XRD) patterns of the catalysts were recorded in the range of $5-80^\circ$ with a Philips X'Pert Pro with Cu-K α radiation to determine the crystalline structure of the samples. The morphological properties were analyzed with a scanning electron microscopy (FEI Quanta250 FEG). The nitrogen adsorption isotherms at 77 K were measured using the Micromeritics ASAP 2010 equipment. The FT-IR spectra was recorded in the $650-3650\text{ cm}^{-1}$ with a Perkin Elmer Spectrum 100 spectrometer. The content of iron in the samples was determined by a Varian-96 Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES). The band gap energy value measurements were accomplished using a UV-Vis DRS /Shimadzu 2600.

According to the XRD patterns of the catalyst samples (Figure 2), the samples have both anatase and rutile phases. The peaks at $2\theta = 25.4^\circ, 37.9^\circ, 48.1^\circ, 53.9^\circ, 55.2^\circ,$ and 62.9° are attributed to the diffractions of the anatase phase and the peaks at $2\theta = 27.5^\circ, 36.0^\circ,$ and 41.2° to the rutile phase [51, 52].

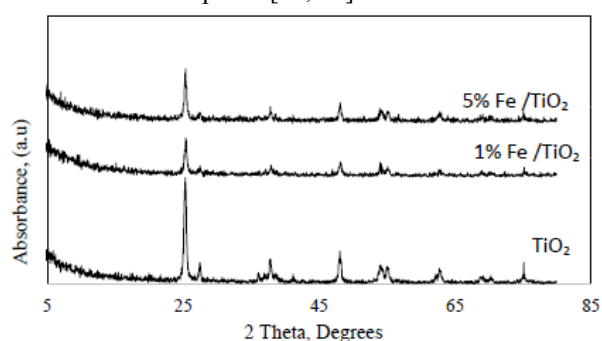
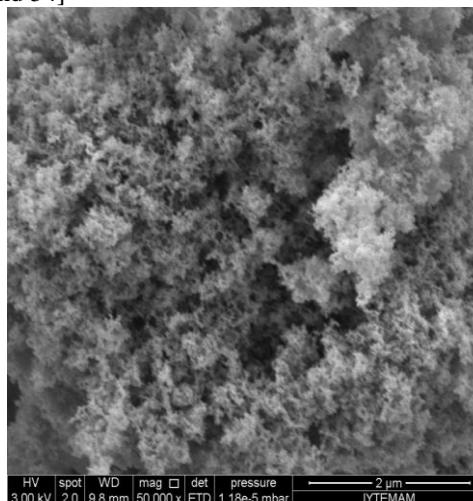


Figure 2. XRD patterns of the prepared catalysts

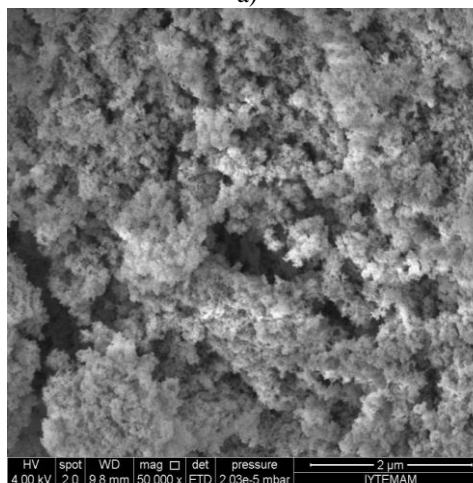
In the FTIR spectra of the prepared catalysts, there was a broad band at the range of $3150 - 3650\text{ cm}^{-1}$ which is assigned to the Ti-OH stretching band [51, 53]. The intensity of this band decreases with the insertion of Fe into the structure. The band at 1640 cm^{-1} indicates the deformation vibration that is evidence for a large amount of water molecules.

The morphological properties were analyzed using a scanning electron microscopy, Figure 3. The surface of

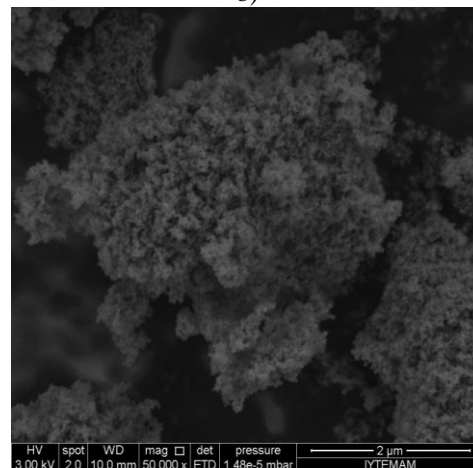
the TiO₂ sample without iron looked coral-like. Heavily aggregated particles of very small crystallites were observed. There is no significant difference between the SEM images of the TiO₂ and the 1 wt% Fe containing TiO₂ sample. However, the insertion of a high amount of iron (5%) into the TiO₂ separated the aggregates of TiO₂ particles from each other which caused a slight decrease in the pore volume and the surface area of the sample [51, 52, and 54]



a)



b)



c)

Figure 3. SEM images of the samples

a) TiO₂ b) 1% Fe/TiO₂ c) 5% Fe/TiO₂

The BET-surface area (S_{BET}), external surface area (S_{external}), total pore volume (V_p), and mean pore diameter (d_{mean}) obtained from the nitrogen adsorption/desorption measurements are shown in Table 1.

Table 1 shows that an increase in the Fe content led to a slight increase in the BET surface area of the catalyst. The pure TiO₂ surface area was 54.1 m²/g and after the incorporation of 1 wt % Fe the surface area increased to 55.5 m²/g. The increase in the surface area with the introduction of the initial amount of Fe can be, generally, explained in two ways: as a result of the reorganization of the pore system of the starting material through the entrance of small particles into the pore system, or as a result of the deposition of the Fe species on the outer side of the TiO₂ particles. The reorganization of the initial system of pores must lead to a decrease of the total pore volume. However, there was no reduction in the total pore volume of the 1 wt% Fe containing TiO₂ catalyst. Clearly, the Fe species are dominantly located on the outer surface of the catalyst. The insertion of Fe to the TiO₂ also caused an increase in the external surface area of the catalysts where the photocatalytic degradation took place. A slight decrease in the surface area was observed with an increase in the doping level of Fe at a calcination temperature of 773 K [49, 51, 55].

The nitrogen adsorption isotherms of the samples are of type II according to IUPAC classification. This result is in good agreement with the study done by Wang et al. [56].

The content of iron in the samples was determined with ICP-AES measurements. The results are shown in Table 1. As seen, the calculated iron contents are very close to the ones measured with ICP-AES measurements.

Table 1. The BET-surface area (S_{BET}), External surface area (S_{external}), total pore volume (V_p), mean pore diameter (d_{mean}), and iron contents of the catalysts prepared

Catalysts	Fe, wt %	S_{BET} , (m ² /g)	S_{external} , (m ² /g)	d_{mean} *, nm	V_p , (cm ³ /g)
TiO ₂	0	54.1	45.9	5.91	0.01400
1% Fe/TiO ₂	0.93	55.5	53.7	8.64	0.01500
5% Fe/TiO ₂	4.46	50.5	47.3	8.85	0.01388

* by BJH method

3.1.1 Diffuse reflectance spectra of prepared catalysts

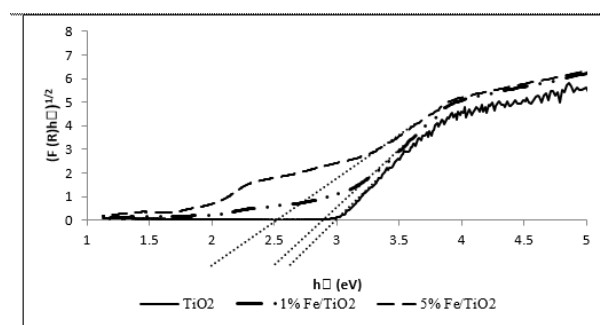
A modified Kubelka-Munk function was used for determining the band gap energy (E_g) of the TiO₂ and Fe-doped TiO₂ samples from the diffuse reflectance spectra, Eq.5:

$$(F(R) \cdot hv)^{1/n} = B(hv - E_g) \quad (5)$$

Where h is Planck's constant, ν is the light frequency, B is a constant, $F(R) = (1-R)^2/2R$, R is reflectance, and $h\nu = (1240/\lambda)$ eV. The band gap can be classified as direct or indirect. In a direct band gap the energy minimum (the bottom) of the conduction band lies directly above the energy maximum (the top) of the valence band in reciprocal k -space. But in the indirect band gap, the energy minimum (the bottom) of the conduction band is

away from the energy maximum (the top) of the valence band [57]. Values of n can be different depending on the

type of electronic transition where $n=2$ for an indirect allowed transition and $n=1/2$ for a direct allowed transition. It has been suggested that anatase TiO₂ follows an indirect transition [58, 59] thus $n=2$ is used in this study. Figure 4 plots the $(F(R) \cdot hv)^{1/n}$ versus the $h\nu$ curve. The value of the band gap energy (E_g) can be obtained by extrapolating the linear part of the curve to the horizontal axis ($h\nu$ axis). The indirect type transition showed band gap values of 3.05, 2.9, and 2.5 eV for catalysts TiO₂, 1% Fe/TiO₂, and 5% Fe/TiO₂, respectively. It was seen that the band gap decreases with increasing Fe content. Based on the band gap energies of the catalysts, the TiO₂ catalyst is expected to be active under UV irradiation, whereas, the Fe doped TiO₂ (with 1 wt% and 5 wt%) catalysts is expected to be active under visible light [59, 60].

**Figure 4.** Diffuse reflectance spectra of the TiO₂ catalysts

3.2 Photo-Fenton-like Oxidation of BPA over Prepared Catalysts

3.2.1 Effects of catalyst type

The activity of the prepared catalysts with different iron contents (1 and 5 wt%) and bare TiO₂ were tested in the photo-Fenton-like oxidation of BPA under visible light. The experiments were carried out with a 15 ppm, 0.3 dm³ BPA aqueous solution in the presence of a 0.5 g/dm³ catalyst and 4.7 mM H₂O₂ at a temperature of 19±1°C. The results are shown in Figure 5.

A first order dependency was obtained in the photo-Fenton-like oxidation of BPA with a high regression coefficient in all the runs. The degradation rate constant of $k = 8.7 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ ($R^2 = 0.95$) was obtained for 1%

Fe/TiO₂, and $k = 6.7 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ ($R^2 = 0.97$) was obtained for 5% Fe/TiO₂.

As seen in Figure 5, the degradation of 24%, 21%, and 0.8% were obtained in the presence of 1 wt%, 5 wt% Fe containing TiO₂ catalysts, and bare TiO₂, respectively,

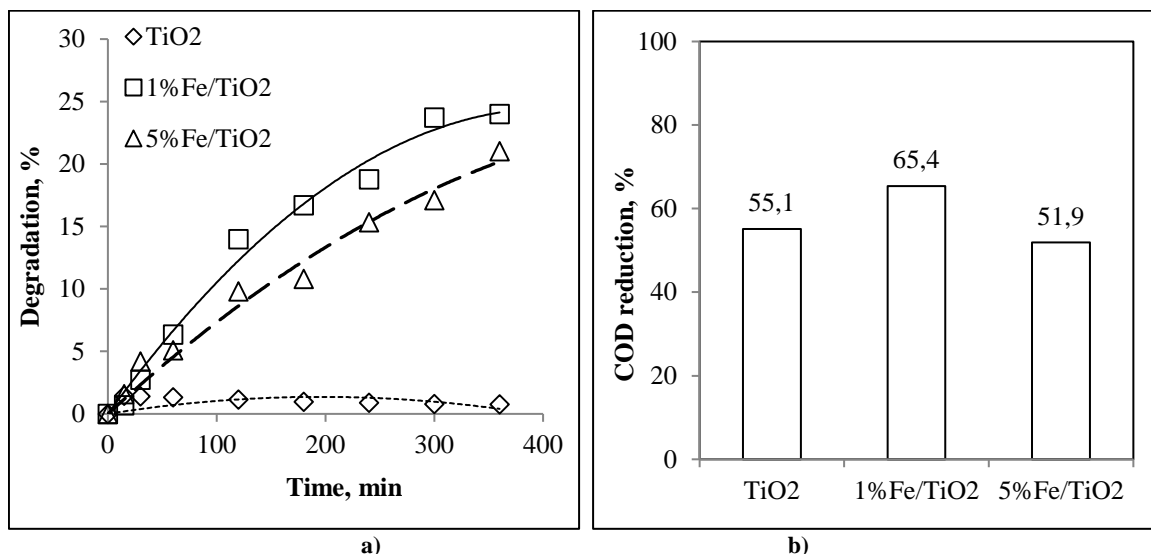


Figure 5. Effects of catalyst type on the photo-Fenton-like oxidation of BPA, a) Degradation, % and b) COD reduction, %, after 6 h of oxidation

after a reaction duration of 6 h. The corresponding COD reductions were 65.4%, 51.9%, and 55.1%. As seen, the most active catalyst was 1 wt% Fe containing TiO₂ catalyst in terms of the degradation and degradation rate constant as well as the COD reduction. The existence of a high amount of Fe (5 wt%) lessens the specific surface

3.2.1 Effects of the initial concentration of BPA

The effect of the initial BPA concentration on the BPA degradation was investigated using different initial BPA concentrations (5 ppm, 10 ppm, 15 ppm, and 20 ppm). The experiments were carried out with a 0.5 g/dm³ 1

wt% Fe/TiO₂ catalyst, at 4.7 mM of H₂O₂ concentration at a temperature of 20±1°C and with a solution volume of 0.3 dm³, the results are shown in Figure 6.

As shown in Figure 6, the highest BPA degradation was reached when the BPA initial concentration was 5 ppm (61.3%). The degradation of BPA decreased as the initial

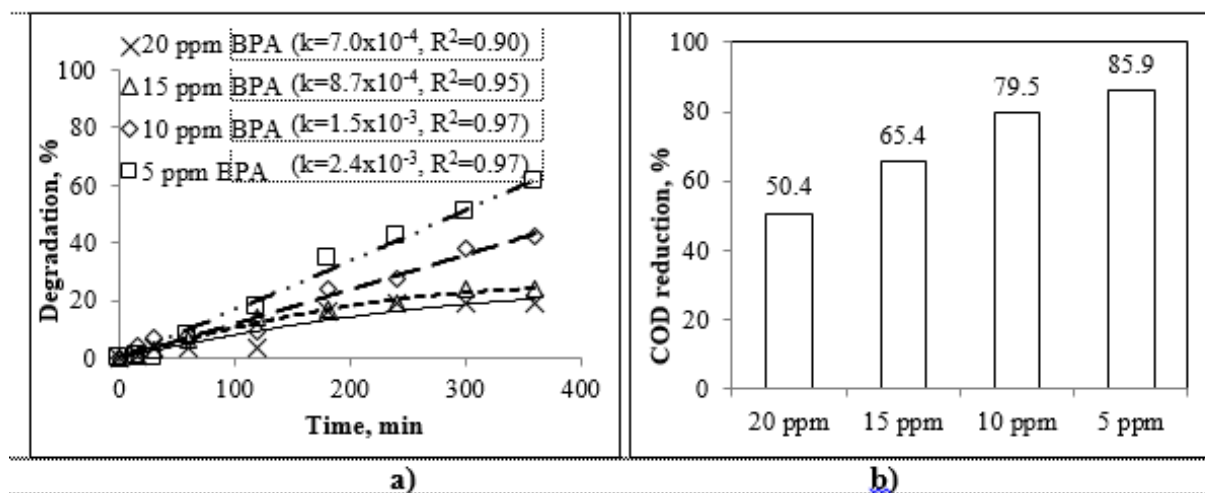


Figure 6. Effects of the initial concentration of BPA on the photo-Fenton-like oxidation, a) Degradation, % and b) COD reduction, %, after 6 h of oxidation

area of the TiO₂ and prevents the adsorption of the reactant and thus, inhibits the photocatalytic activity. An excess amount of dopant at the surface of the TiO₂ could notably screen off the TiO₂ from the light and inhibit the interfacial electron and hole to transfer, which would result in a low photo-activity [61]. So the parametric study on degradation of BPA with the heterogeneous photo-Fenton-like oxidation was carried out using the 1 wt % Fe containing TiO₂ catalyst.

BPA concentration increased from 5 ppm to 20 ppm. The COD reduction also decreased remarkably from 85.9% to 50.4%. This result can be explained by the formation of the hydroxyl radicals which are less than the required amount for high BPA concentrations. As seen in Figure 6a, there is a remarkable decrease in the reaction rate constant with an increasing BPA concentration from 5 ppm to 20 ppm. This similar result is consistent with the study of Lu et al. [62].

The active sites for the photocatalytic reaction remain the same at a fixed catalyst amount. As the BPA initial concentration increases, more and more BPA molecules are adsorbed on the surface of the catalyst. The accumulation of BPA molecules in the inner layer spacing on the TiO₂ surface results in the adsorption competition for the active sites between the BPA molecules and the prevention of the photocatalytic

The increase in degradation may be expected when the H₂O₂ concentration is increased due to the additionally produced ·OH radicals [32]. In this study, the highest degradation (52.0%), reaction rate constant ($k=1.8 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$), and COD reduction of BPA (72.3%) were observed when H₂O₂ was used at 1.5 times that of the stoichiometric ratio (3.6 mM), see Figures 7a-b. Increasing the H₂O₂ concentration did not enhance the

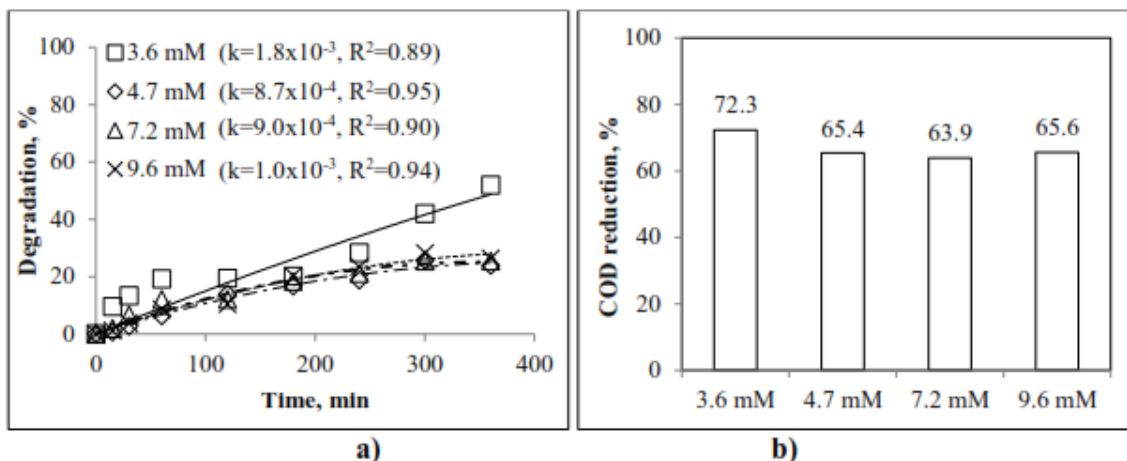


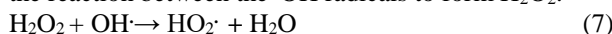
Figure 7. Effects of the initial concentration of H₂O₂ on the photo-Fenton-like oxidation, a) Degradation, %, and b) COD reduction, %, after 6 h of oxidation

activity of the TiO₂ catalyst, which decreases the amount of reactive hydroxyl free radicals attacking the BPA molecules and leads to the diminution of BPA photodegradation efficiency [22].

3.2.2 Effects of the initial concentration of H₂O₂

In this section four different initial concentrations of H₂O₂ were tested in the photo-Fenton-like oxidation of BPA over a 1 wt% Fe/TiO₂ catalyst. The selected concentrations of H₂O₂ are 1.5, 2, 3, and 4 times (3.6 mM, 4.7 mM, 7.2 mM, and 9.6 mM) of the stoichiometric ratio according to the equation:

oxidation due to the hydroxyl radical scavenging effect of the H₂O₂ itself, see equations (7) and (8), and Eq. (9) the reaction between the ·OH radicals to form H₂O₂.



3.2.3 Effects of the catalyst amount

In order to obtain the optimum Fe/TiO₂ catalyst concentration in the reaction system, the effect of various photocatalyst amounts (0.25 g/dm³, 0.5 g/dm³, and 1 g/dm³) was investigated on the degradation efficiency of

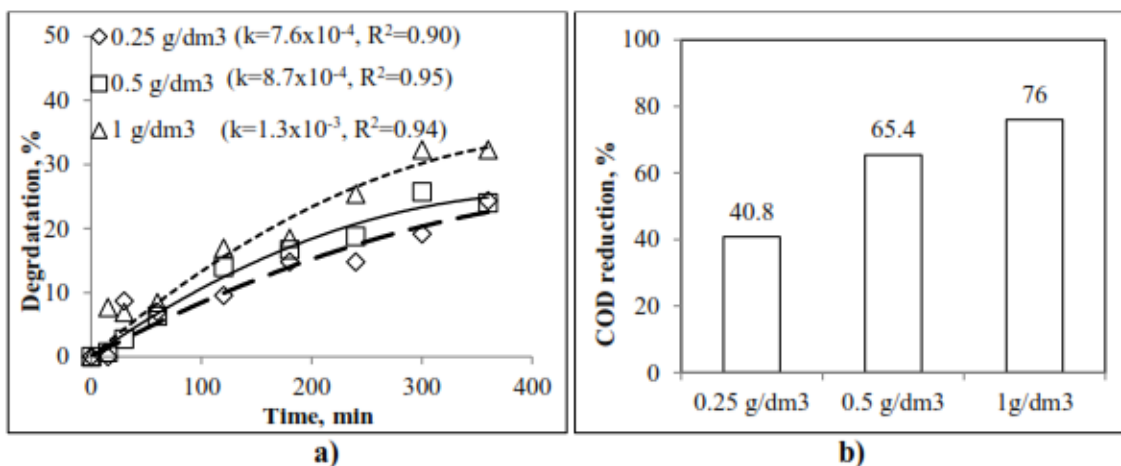


Figure 8. Effects of the catalyst amount on the photo-Fenton-like oxidation, a) Degradation, % and b) COD reduction, %, after 6 h of oxidation



The experiments were carried out with a 0.5 g/dm³ of 1wt% Fe/TiO₂ catalyst, at a temperature of 20±1°C, at the initial concentration of 15 ppm BPA and with a 0.3 dm³ BPA solution, and the results are shown in Figure 7.

BPA in water at the initial BPA concentration of 15 ppm, at a pH of 5.5, with a 1 wt% Fe/TiO₂ catalyst, at an H₂O₂ concentration of 4.7 mM, at a temperature of 20±1°C and with a solution volume of 0.3 dm³. The results are shown in Figure 8.

An increase in the catalyst amount led to increased degradation and COD reduction. The highest degradation of 32.3% was obtained using a 1 g/dm³ amount of catalyst after a reaction time of 6 h. The COD reduction increased from 40.8% to 65.4% and then to 76.0% by increasing the catalyst amount from 0.25 g/dm³ to 0.5 g/dm³ and then to 1g/dm³, respectively. However, no significant change in the initial degradation rate was observed with the increased amount of catalyst. The efficiency increases with the rise in the number of active sites on the catalyst surface for the photocatalytic reaction which is in parallel with the increasing amount of Fe/TiO₂ [21, 63, 64]. As expected, the first order reaction rate constant increased with the increase in the catalyst amount, see Figure 8a.

3.2.4 Effects of initial pH value of BPA

To investigate the effect of the initial pH value of the BPA solution on the photo-Fenton-like oxidation of BPA, experiments were conducted with 5 different pH values: 2.6, 3.8, 5.5, 8.3, and 9.1. Regulation of the pH was accomplished using an H₂SO₄ or NaOH solution. The results are shown in Figure 9.

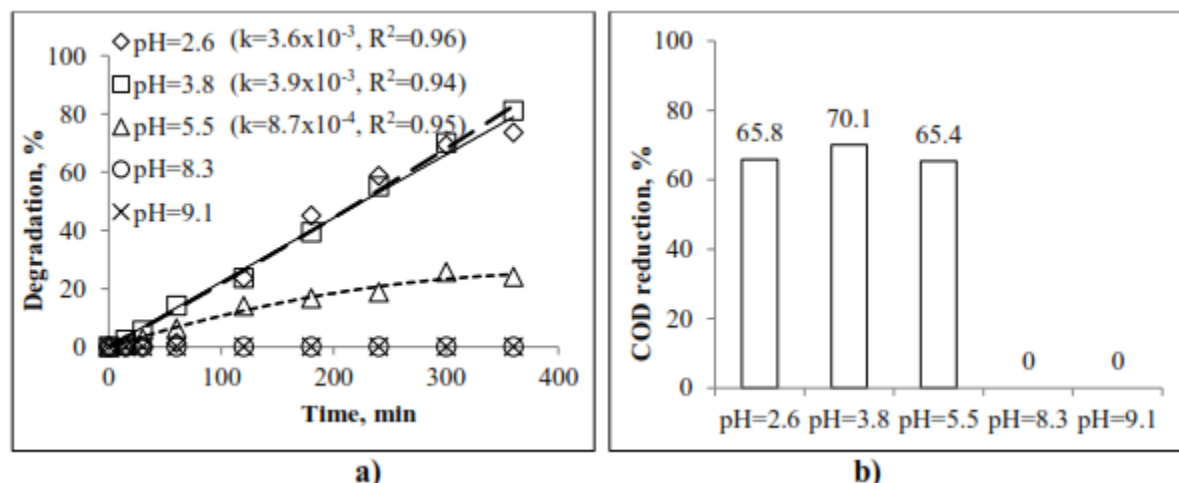


Figure 9. Effects of the BPA initial pH values on the photo-Fenton-like oxidation, a) Degradation, % and b) COD reduction, %, after 6 h of oxidation

The pH variation can alter the surface property of the catalyst, the ionization state of the organic compound, as well as the formation rate of hydroxyl radicals, and other reactive oxygen species responsible for the pollutant degradation. Therefore, the solution pH is another important factor influencing the BPA photodegradation [62].

In general, the TiO₂ surface is positively charged for pH values lower than the zero point change (zpc) of the TiO₂ (6.25), whereas, it is negatively charged for pH values higher than the zpc of the TiO₂. On the basis of the simulation of the molecular point charge, it was found that the BPA molecule has two negative oxygen atoms in

the hydroxyl groups and four negative carbon atoms in the phenolic group. These properties determine the initial adsorption of the BPA molecules on the TiO₂ surface. Hence, the acidic conditions for pH < 6.25 favor the initial adsorption of BPA on the positively charged TiO₂ surface. On the contrary, as the pH increases and is higher than 6.25, the TiO₂ surface gradually becomes more negatively charged, which results in the development of greater repulsive forces between the TiO₂ surface and the BPA molecules and thus the obstacle of the initial adsorption of BPA on the TiO₂ surface [56]. In addition, a low pH favors OH[•] radical generation, and the oxidation potential of the highly oxidative radicals decreases with the increasing pH. The OH[•] radicals have an oxidation potential of 2.65 - 2.80 V at a pH 3, while only 1.90 V at a pH 7.0 as a weaker oxidant [64].

As seen in Figure 9, the acidic pH was favorable for the degradation of BPA and COD reduction. The highest COD reduction achieved was 70.1% at a pH of 3.8. The remarkable decrease in the reaction rate constant was observed by increasing the solution pH from 3.8 to 5.5.

Adsorption studies in the absence of visible light indicated that a BPA adsorption of 2% was achieved on the catalyst surface in 30 min at a pH of 2.6 and 3.8 while no BPA adsorption was observed at other pH values under the same conditions.

3.2.5 Effects of reaction temperature

The effect of the reaction temperature on the degradation of BPA was examined in the range of 292 - 303K. The experiments were carried out at a pH of 5.5 with a 0.5 g/dm³ of 1 wt% Fe/TiO₂ catalyst, at an H₂O₂ concentration of 4.7 mM with a 15 ppm / 0.3 dm³ BPA solution. The results are shown in Figure 10.

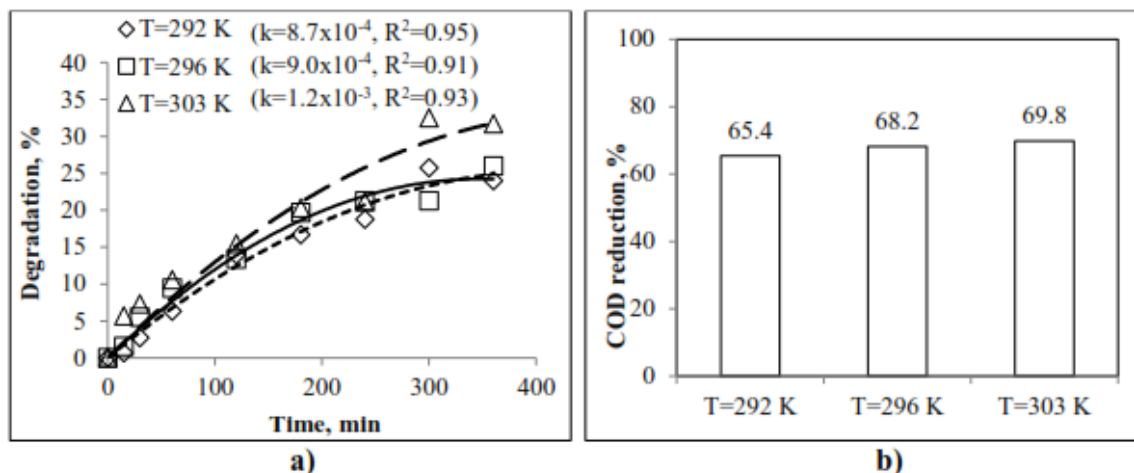


Figure 10. Effects of reaction temperature on the photo-Fenton-like oxidation a) Degradation, % and b) COD reduction, %, after 6 h of oxidation

As seen in Figure 10, as the temperature increased from 292 K to 303 K, the degradation percentage of BPA increased from 24.0% to 31.7% mainly due to the increase in the rate constant of the heterogeneous photo-Fenton-like reaction, see Figure 10a. Increasing the temperature from 292K to 296K and then to 303K, increased the COD reduction from 65.5% to 68% and to 69.8% after a reaction of 6 h, respectively. The optimum temperature was selected as 303K [14].

3.2.6 Stability of the catalyst

The catalyst stability experiments were carried out under the following conditions: a 15 ppm initial concentration

of BPA with a 0.3 dm³ BPA solution, at a H₂O₂ concentration of 4.7 mM, with a 0.5 g/ dm³ catalyst, at a pH of 5.5. Firstly the experiment was performed with a fresh catalyst (first cycle). To recover the catalyst, after 6h of reaction, the final effluent was filtered. The used catalyst was washed with water and then ethanol, and then dried at 393K for 3 h and calcined at 773K for 3h. The calcined catalyst was then tested in the photo-Fenton-like degradation of BPA (second cycle). After 6h of reaction the catalyst was recovered as mentioned above and its activity was again tested in BPA oxidation (third cycle). The results are given in Figure 11.

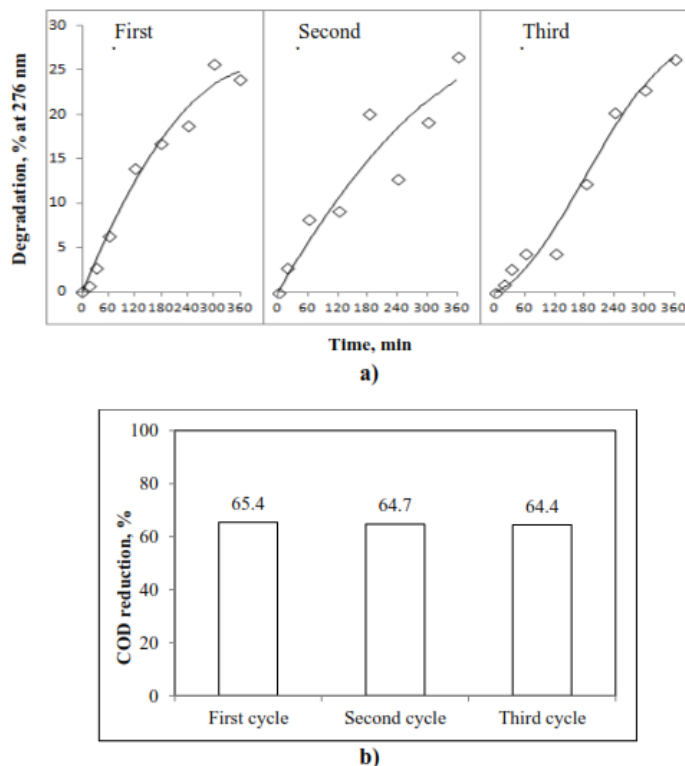


Figure 11. Stability of the Catalyst a) Degradation,%, and b) COD reduction, %, after 6 h of oxidation

As seen in Figure 11, the degradation of BPA was almost the same when fresh (first cycle) and used catalysts (second and third cycles) were tested. The COD reduction slightly decreased from 65.4% to 64.7% and then to 64.4% for the second and third cycle, respectively. The calculated first order rate constants were similar 8.7×10^{-4} , 8.0×10^{-4} , and $7.0 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ for the 1st (fresh), 2nd and 3rd use of the catalyst, respectively.

The stability of the catalyst was also tested by measuring the iron leaching into the solution by an Atomic Absorption spectrometer (Varian 10 plus). In all runs, iron leaching into the solution remained in the range of 0.09 mg/dm^3 - 0.95 mg/dm^3 which is below E.U. directives ($< 2 \text{ mg/dm}^3$). These results show that the catalyst has a good stability and the process is mainly the heterogeneous photo-Fenton-like process, instead of the homogenous photo-Fenton-like process.

3.2.7 Optimum conditions of the heterogeneous photo-Fenton-like oxidation of BPA

According to the results obtained from Parts 3.2.2 - 3.2.6; the best experimental conditions for the efficient degradation of BPA by heterogeneous photo-Fenton-like oxidation were determined to be:

The initial concentration of BPA = 5 ppm, H_2O_2 concentration = 3.6 mM, catalyst loading = 1 g/dm^3 , at a pH of 3.8, at a temperature of 303 K.

Under these conditions 81.3% of degradation and a COD removal of 89.4% were achieved after 6h of reaction.

3.2.8 Degradation kinetics of BPA

In the photo-Fenton-like oxidation of BPA, the reaction mixture was stirred vigorously at 700 rpm. The effect of external diffusion resistance on the degradation rate was calculated using Hougen's criterion and it was found that $(C_b - C_s)/C_b \approx 1.5 \times 10^{-3} < 0.1$, it indicated that $C_b \approx C_s$. So, the external diffusion resistance could be neglected. The internal diffusion resistance was not significant due to the small size of catalyst particles (60 nm). To calculate the effect of the internal diffusion resistance on the degradation rate, the generalized Thiele modulus based on the reaction rate was determined and found to be

1.3×10^{-7} which was smaller than 1/3. Hence the effectiveness factor was assumed to be unity [65].

Figure 12 shows the Arrhenius plot of $\ln k$ vs. $1/T$ obtained using the k values given in Figure 10. From the slope of the Arrhenius plot ($R^2=0.92$) in Figure 12, $-E/R$, where R is the universal gas constant (8.314 J/mol K), and the activation energy, E , was calculated to be 22.5 kJ/mol. Finally, the degradation rate of BPA can be expressed by the following equation:

$$-r_{\text{BPA}} = 8.75e^{-22.5/RT} C_{\text{BPA}} \quad (10)$$

In literature, the BPA degradation via the hot persulfate treatment process followed the pseudo-first order kinetics with respect to the BPA concentration. Based on the obtained pseudo first order rate constant at the temperature range of 40 - 70 °C, the activation energy for BPA oxidation was calculated as $184 \pm 12 \text{ kJ/mol}$ [66]. The oxidation kinetics of BPA by Mn(VII) was described by a second order rate law, but the order with respect to BPA was first order with an activation energy of 67.8 kJ/mol in the temperature range of 10 - 30 °C [67]. In another study, the degradation BPA by hydrogen peroxide activated with CuFeO_2 , Cu_2O or Fe_3O_4 followed a pseudo first order reaction in kinetics. The calculated activation energies were 53.7 kJ/mol, 54.3 kJ/mol, and 64.9 kJ/mol at temperatures between 10 to 40 °C for CuFeO_2 , Cu_2O , or Fe_3O_4 , respectively [68]. The degradation of BPA with the Co^+ /PMS process followed the pseudo first order kinetic model well at a temperature range of 25 - 45 °C with an activation energy of 57.6 kJ/mol [69]. In the other study, the BPA decomposition in the UV/persulfate process was investigated and the activation energy of 26 kJ/mol was calculated for pseudo first order rate constants at the temperatures between 25 °C to 50 °C [70]. There were also some studies in literature in which the BPA degradation kinetics were described by a pseudo second order reaction model [71, 72]. In a study by Han et al. [72] the degradation of BPA was investigated by ferrate (IV) oxidation and in that study an activation energy of 35.71 kJ/mol was calculated for the second order reaction kinetics with respect to the BPA concentration. The activation energy

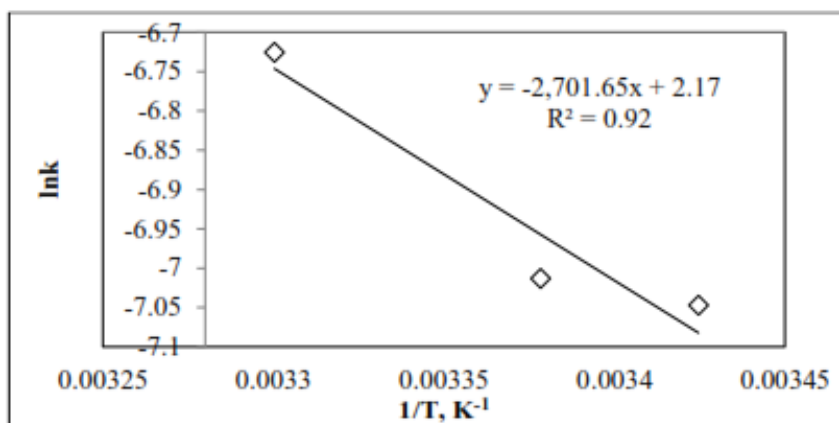


Figure 12. Graph of $\ln k$ values versus $1/T$ values

obtained in this study for the degradation of BPA is close to the one given by Huang and Huang [70].

4. CONCLUSIONS

In the present study, the oxidation of Bisphenol-A was investigated using the heterogeneous photo-Fenton-like oxidation under visible light irradiation in the presence of Fe containing TiO₂ catalyst.

The 1 wt% iron containing TiO₂ catalyst behaves as an efficient and stable catalyst for the photocatalytic degradation of BPA which is an important endocrine disrupting compound. It was clear that the doping of Fe to TiO₂ at a certain amount altered the photocatalytic degradation of BPA under visible light. The photocatalytic activity depended on the Fe loading to the TiO₂, BPA and H₂O₂ initial concentration, catalyst amount, pH of solution, and temperature. At the optimum reaction conditions of, an initial concentration of BPA of 5 ppm, an H₂O₂ concentration of 3.6 mM, a catalyst loading of 1 g/dm³, a pH of 3.8, and a temperature of 303 K, an 81.3% degradation and a COD removal of 89.4% were achieved after 6h of reaction. The activation energy was calculated to be 22.5 kJ/mol.

ACKNOWLEDGMENTS

The author acknowledges the financial support from the Ege University Scientific Research Fund under project No 13MÜH037. The author also acknowledges the assistance and guidance of Professor Gönül Gündüz during this study.

5. REFERENCES

- Kang J.H., Kondo F. and Katayama Y., "Human exposure to Bisphenol-A", *Toxicology*, 226: 79-89, (2006)
- Er B. and Sarımehtemetoğlu B., "Evaluation of presence of Bisphenol-A in foods", *Vet. Hekim Der.*, 82: 69-74, (2011).
- Zhang K., Gao N., Deng Y., Lin T.F., Ma Y., Li L. and Sui M., "Degradation of Bisphenol-A using ultrasonic irradiation assisted by low-concentration hydrogen peroxide", *J. Environ. Sci.*, 23: 31-36, (2011).
- Gültekin I. and İnce N.H., "Ultrasonic destruction of Bisphenol-A: The operating parameters", *Ultrason. Sonochem.*, 15: 524-529, (2008).
- Torres R.A., Petrier C., Combet E., Carrier M. and Pulgarin C., "Ultrasonic cavitation applied to the treatment of Bisphenol A. Effect of sonochemical parameters and analysis of BPA by-products", *Ultrason. Sonochem.*, 15: 605-611, (2008).
- Inoue M., Masuda Y., Okada F., Sakurai A., Takahashi I. and Sakakibara, M., "Degradation of Bisphenol A using sonochemical reactions", *Water Res.*, 42: 1379-1386, (2008).
- Guo Z. and Feng R., "Ultrasonic irradiation-induced degradation of low-concentration Bisphenol A in aqueous solution", *J. Hazard. Mater.*, 163: 855-860, (2009).
- Petrier C., Torres-Palma R., Combet E., Sarantakos G., Baup S. and Pulgarin, C., "Enhanced sonochemical degradation of Bisphenol-A by bicarbonate ions", *Ultrason. Sonochem.*, 17: 111-115, (2010).
- Son Y., Lim M., Khim J., Kim L.H. and Ashokkumar, M., "Comparison of calorimetric energy and cavitation energy for the removal of bisphenol-A: The effects of frequency and liquid height", *Chem. Eng. J.*, 183: 39-45 (2012).
- Torres R.A., Abdelmalek F., Combet E., Petrier C. and Pulgarin, C., "A Comparative Study of Ultrasonic Cavitation and Fenton's Reagent for Bisphenol A Degradation in Deionized and Natural Waters", *J. Hazard. Mater.*, 146: 546-551, (2007).
- Ioan I., Wilson S., Lundanes E. And Neculai, A., "Comparison of Fenton and sono-Fenton Bisphenol A degradation", *J. Hazard. Mater.*, 142: 559-563, (2007).
- Mohapatra D.P., Brar S.K., Tyagi, R.D. and Surampalli R.Y., "Concomitant degradation of Bisphenol A during ultrasonication and Fenton oxidation and production of biofertilizer from wastewater sludge", *Ultrason. Sonochem.*, 18: 1018-1027, (2011).
- Huang R., Fang Z., Yan X. and Cheng, W., "Heterogeneous sono-Fenton catalytic degradation of Bisphenol A by Fe₃O₄ magnetic nanoparticles under neutral condition", *Chem. Eng. J.*, 197: 242-249, (2012).
- Katsumata H., Kawabe S., Kaneco S., Suzuki T. and Ohta, K., "Degradation of Bisphenol A in water by the Photo-Fenton reaction", *J. Photoch. Photobio. A.*, 162: 297-305, (2004).
- Lin K., Ding J., Wang H., Huang X. and Gan J., "Goethite-Mediated transformation of Bisphenol A", *Chemosphere*, 89: 789-795, (2012).
- Zhou D., Wu F., Deng N. and Xiang, W., "Photooxidation of Bisphenol A (BPA) in water in the presence of ferric and carboxylate salts", *Water Res.*, 38: 4107-4116, (2004).
- Neamtu M. and Frimmel F.H., "Degradation of endocrine disrupting Bisphenol A by 254 nm irradiation in different water matrices and effect on yeast cells", *Water Res.*, 40: 3745-3750, (2006).
- Ohko Y., Ando I., Chisa N., Tatsuma T., Yamamura T., Nakashima T., Kubota Y. and Fujishima A., "Degradation of Bisphenol A in water by TiO₂ photocatalyst", *Environ. Sci. Technol.*, 35: 2365-2368, (2001).
- Chiang K., Lim T.M., Tsen L. and Lee, C.C. "Photocatalytic degradation and mineralization of Bisphenol A by TiO₂ and platinumized TiO₂", *Appl Catal A-Gen.*, 261: 225-237, (2004).
- Wang G., Wu F., Zhang X., Luo M. and Deng N., "Enhanced TiO₂ photocatalytic degradation of Bisphenol A by β -cyclodextrin in suspended solutions", *J. Photoch. Photobio. A.*, 179: 49-56, (2006).
- Tsai W.T., Lee M.K. Su T.Y. and Chang Y.M., "Photodegradation of Bisphenol A in a batch TiO₂ suspension reactor". *J. Hazard. Mater.*, 168: 269-275, (2009).
- Wang R., Ren D., Xia S., Zhang Y. and Zhao, J., "Photocatalytic degradation of Bisphenol A (BPA) using immobilized TiO₂ and UV illumination in a horizontal circulating bed photocatalytic reactor (HCBPR)", *J. Hazard. Mater.*, 169: 926-932, (2009).
- Gao B., Lim T.M., Subagio D.P. and Lim T., "Zr-doped TiO₂ for enhanced photocatalytic degradation of Bisphenol A". *Appl Catal A-Gen.*, 375: 107-115, (2010).

24. Kuo C., Wu C. and Lin H., "Photocatalytic degradation of Bisphenol A in a visible light/TiO₂ system", *Desalination*, 256: 37-42, (2010).
25. Wan X. and Lim, T., "Solvothermal synthesis of C-N codoped TiO₂ and photocatalytic evaluation for Bisphenol A degradation using a visible-light irradiated LED photoreactor", *Appl. Catal. B-Environ.*, 100: 355-364, (2010).
26. Qing Z., Jinhua L., Hongchong C., Quanpeng C., Baoxue Z., Shuchuan S. and Weimin, C., "Characterization and mechanism of the photoelectrocatalytic oxidation of organic pollutants in a thin-layer reactor", *Chinese J. Catal.*, 32: 1357-1363, (2011).
27. Yang J., Dai J. and Li, J., "Synthesis, characterization and degradation of Bisphenol A using Pr, N co-doped TiO₂ with highly visible light activity", *Appl. Surf. Sci.*, 257: 8965-8973, (2011).
28. Li F.B., Li X.Z., Liu C.S. and Liu, T.X., "Effect of alumina on photocatalytic activity of iron oxides for Bisphenol A degradation", *J. Hazard. Mater.*, 149: 199-207, (2007).
29. Wang C., Zhu L., Song C., Shan G. and Chen P., "Characterization of photocatalyst Bi_{3.84}W_{0.16}O_{6.24} and its photodegradation on Bisphenol A under simulated solar light irradiation", *Appl. Catal. B-Environ.*, 105: 229-236, (2011).
30. Wang C., Zhu L., Wei M., Chen P. and Shan, G., "Photolytic reaction mechanism and impacts of coexisting substances on photodegradation of Bisphenol A by Bi₂WO₆ in water", *Water Res.*, 46: 845-853, (2012).
31. Wang C., Zhu L., Chang C., Fu Y. and Chu X., "Preparation of magnetic composite photocatalyst Bi₂WO₆/CoFe₂O₄ by two-step hydrothermal method and its photocatalytic degradation", *Catal. Commun.*, 37: 92-95, (2013).
32. Katsumata H., Taniguchi M., Kaneco S. and Suzuki T., "Photocatalytic degradation of Bisphenol A by Ag₃PO₄ under visible light", *Catal. Commun.*, 34: 30-34, (2013).
33. Yang X., Tian P., Zhang C., Deng Y., Xu J., Gong J. and Han Y., "Au/Carbon as Fenton-like catalysts for oxidative degradation of Bisphenol A", *Appl. Catal. B-Environ.*, 134-135: 145-152, (2013).
34. Irmak S., Erbatur O. and Akgerman, A., "Degradation of 17 β -estradiol and Bisphenol A in aqueous medium by using ozone and ozone/UV techniques", *J. Hazard. Mater.*, B126: 54-62, (2005).
35. Deborde M., Rabouan S., Mazellier P., Duguet J.P. and Legube, B., "Oxidation of Bisphenol A by ozone in aqueous solution", *Water Res.*, 42: 4299-4308, (2008).
36. Garoma T. and Matsumoto S., "Ozonation of aqueous solution containing Bisphenol A: Effect of operational parameters", *J. Hazard. Mater.*, 167: 1185-1191, (2009).
37. Torres-Palma R.A., Nieto J.I., Combet E., Petrier C. and Pulgarin C., "An innovative ultrasound, Fe²⁺ and TiO₂ photoassisted process for Bisphenol A mineralization", *Water Res.*, 44: 2245-2252, (2010).
38. Lim M., Son Y., Na S. and Khim, J., "Effect of TiO₂ concentration for sonophotocatalytic degradation of Bisphenol A", *Proceedings of Symposium on Ultrasonic Electronics*, 31: 103-104, (2010).
39. Poerschmann J., Trommler, U. and Gorecki, T., "Aromatic intermediate formation during oxidative degradation of Bisphenol A by homogeneous sub-stoichiometric Fenton reaction", *Chemosphere*, 7: 975-986, (2010).
40. Leiw M.Y., Guai G.H., Wang X., Tse M.S., Mang N.C. and Tan O.K., "Dark ambient degradation of Bisphenol A and Acid Orange 8 as organic pollutants by perovskite SrFeO_{3-x} metal oxide", *J. Hazard. Mater.*, 260: 1-8, (2013).
41. Xie Y.B. and Li X.Z., "Degradation of Bisphenol A in aqueous solution by H₂O₂- assisted photoelectrocatalytic oxidation", *J. Hazard. Mater.*, B38: 526-533, (2006).
42. Wang X. and Lim T.T., "Effect of hexamethylenetetramine on the visible light photocatalytic activity of C-N codoped TiO₂ for Bisphenol-A degradation: Evaluation of photocatalytic mechanism and solution toxicity", *Appl Catal A-Gen.*, 399: 233-241, (2011).
43. Xing R., Wu L., Fei Z. and Wu, P., "Mesopolymer modified with palladium phthalocyaninesulfonate as a versatile photocatalyst for phenol and Bisphenol A degradation under visible light irradiation", *J. Environ. Sci.*, 25(8): 1687-1695, (2013).
44. Zhang L., Wang W., Sun S., Sun Y., Gao E. and Zhang, Z., "Elimination of BPA endocrine disruptor by magnetic BiOBr@SiO₂@Fe₃O₄ photocatalyst", *Appl. Catal. B-Environ.*, 148-149: 164-169, (2014).
45. Wang C., Zhu J., Wu X., Xu H., Song Y., Yan J., Song Y., Ji H., Wang K. and Li, H., "Photocatalytic degradation of Bisphenol A and dye by graphene-oxide/Ag₃PO₄ composite under visible light irradiation", *Ceram. Int.*, 40: 8061-8070, (2014).
46. Sun S., Ding J., Bao J., Gao C., Qi Z., Yang X., He B. and Li C., "Comparison of calorimetric energy and cavitation energy for the removal of Bisphenol-A: The effects of frequency and liquid height", *Appl. Surf. Sci.*, 258: 5031-5037, (2012).
47. Pelaez M., Nolan N.T., Pillai S.C., Seery M.K., Falaras P., Kontos A.G., Dunlop P.S.M., Hamolton J.W.J., Byrne J.A., O'Shea K., Entezari M.H. and Dionysiou D.D., "A review on the visible light active titanium dioxide photocatalysts for environmental applications", *Appl. Catal. B-Environ.*, 125: 331-349, (2012).
48. Lezner M., Grabowska E. and Zaleska A., "Preparation and photocatalytic activity of iron- modified titanium dioxide photocatalyst", *Physicochem. Probl. Mi.*, 48: 193-200, (2012).
49. Akin-Ünnü B., Gündüz G. and Dükkancı M., "Heterogeneous Fenton-like oxidation of Crystal Violet using an iron loaded ZSM-5 zeolite". *Desalin. Water Treat.*, 57: 11835-11849, (2016)
50. Arana J., Diaz G., Saracho M.M., Rodriguez J.M.D., Melian J.A.H. and Pena J.P., "Maleic acid photocatalytic degradation using Fe-TiO₂ catalysts: Dependence of the degradation mechanism on the Fe catalysts content", *Appl. Catal. B-Environ.*, 36(2): 113-124, (2002).
51. Demir N., Gündüz G. and Dükkancı, M., "Degradation of a textile dye, Rhodamine 6G (Rh6G), by heterogeneous sonophotofenton process in the presence of Fe containing TiO₂ catalysts", *Environ. Sci. Pollut. R.*, 22: 3193-3201, (2015).
52. Khalid N.R., Ahmed E., Ikram M., Ahmed M., Phoenix D.A., Elhissi A., Ahmed W. and Jackson M.S., "Effects of Calcination on Structural Photocatalytic Properties of

- TiO₂Nanopowders via TiCl₄ Hydrolysis”, *J Mater. Eng. Perform.*, 22: 371-375, (2013).
53. Tayade R.J., Suroliya P.K., Kulkarni R.G. and Jasra, R.V., “Photocatalytic degradation of dyes and organic contaminants in water using nanocrystalline anatase and rutile TiO₂”, *Sci. Technol. Adv. Mat.*, 8: 455-462, (2007).
 54. Zhao B.X., Shi B.C., Zhang X.L., Cao X. and Zhang, Y.Z., “Catalytic wet hydrogen peroxide oxidation of H-acid in aqueous solution with TiO₂-CeO₂ and Fe/TiO₂-CeO₂ catalysts”, *Desalination*, 268: 55-59, (2011).
 55. Jamalluddin N.A. and Abdullah A.Z., “Reactive dye degradation by combined Fe(III)/TiO₂ catalyst and ultrasonic irradiation: Effect of Fe(III) loading and calcination temperature”, *Ultrason. Sonochem.*, 18: 669-678, (2011).
 56. Wang A.J., Cuan A., Salmanes J., Nava N., Castillo S., Moranpineda M. and Rojas, F., “Studies of sol-gel TiO₂ and Pt/TiO₂ catalysts for NO reduction by CO in an oxygen rich condition”, *Appl. Surf. Sci.*, 230: 94-105, (2004).
 57. Seo D.K., Hoffmann R., “Direct and indirect band gap types in one-dimensional conjugated or stacked organic materials”, *Theor Chem Acc.*, 102:23-32, (1999).
 58. Hörmann U., Kaiser U., Albrecht M., Geserick j., Hüsing N., “Structure and luminescence of sol-gel synthesized anatase nanoparticles”, *16th International Conference on Microscopy of Semiconducting Materials, J. Physics: Conference Series*, 012039, 209:1-6, (2010).
 59. Mi J.L., Johnsen S., Clausen C., Hald P., Lock N. So L. and Iversen B.B., “Highly controlled crystallite size and crystallinity of pure and iron-doped anatase-TiO₂ nanocrystals by continuous flow supercritical synthesis”, *J. Mater. Res.*, 28: 333-339, (2013).
 60. Ganesh I., Kumar P.P., Gupta A.K., Sekhar P.C.S., Radha K., Padmanabham G. and Sundararajan G., “Preparation and characterization of Fe-doped TiO₂ powders for solar light reponse and photocatalytic applications”, *Proc. Appli. Cera.*, 6: 21-36, (2012).
 61. Akpan U.G. and Hameed B.H., “Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO₂- based photocatalysts: A review”, *J. Hazard. Mater.*, 170: 520-529, (2008).
 62. Lu N., Lu Y., Liu F., Zhao K., Yuan X., Zhao Y., Li Y., Qin H. and Zu, J., “H₃PW₁₂O₄₀/TiO₂ catalyst-induced photodegradation of Bisphenol A (BPA): Kinetics, toxicity and degradation pathways”, *Chemosphere*, 91: 1266-1272, (2013).
 63. Chen Y., Wang K. and Lou L., “Photodegradation of dye pollutants on silica gel supported TiO₂ particles under visible light irradiation”, *J. Photochem. Photobiol. A.*, 163: 281-287, (2004).
 64. Chen A., Ma X. and Sun H., “Decolorization of KN-R catalyzed by Fe-containing Y and ZSM-5 zeolites”, *J. Hazard. Mater.*, 156: 568-575, (2008).
 65. Fogler H.S., “Elements of Chemical Reaction Engineering”, *Prentice Hall PTR*, Third Edition, 698 and 703, (1999).
 66. Olmez-Hanci T., Alaton I.A. and Genç B., “Bisphenol A treatment by the hot persulfate process: Oxidation products and acute toxicity”, *J. Hazard. Mater.*, 261: 283-290, (2013).
 67. Zhang J., Sun B. and Guan X., “Oxidative removal of Bisphenol A permanganate: Kinetics, pathways and influences of co-existing chemicals”, *Sep. Purif. Technol.*, 107: 48-53, (2013).
 68. Zhang X., Ding Y., Tang H., Han X., Zhu L. and Wang N., “Degradation of Bisphenol A by hydrogen peroxide activated with CuFeO₂ microparticles as a heterogeneous Fenton-like catalyst: Efficiency, stability and mechanism”, *Chem. Eng. J.*, 236: 251-262, (2014).
 69. Huang Y.F. and Huang, Y.H., “Behavioral evidence of the dominant radicals and intermediates involved in bisphenol A degradation using an efficient Co²⁺/PMS oxidation process”, *J. Hazard. Mater.*, 167: 418-426, (2009).
 70. Huang Y.F. and Huang Y.H., “Identification of produced powerful radicals involved in the mineralization of bisphenol A using a novel UV-Na₂S₂O₈/H₂O₂-Fe(II,III)”, *J. Hazard. Mater.*, 162: 1211-1216, (2009).
 71. Zhang P., Zhang G., Dong J., Fan M. and Zeng, G., “Bisphenol A oxidative removal by ferrate (Fe(VI)) under a weak acidic condition”, *Sep. Purif. Technol.*, 84: 46-51, (2012).
 72. Han Q., Wang H., Dong W., Liu T., Yin Y. and Fan H., “Degradation of bisphenol A by ferrate (VI) oxidation: kinetics, products and toxicity assessment”, *Chem. Eng. J.*, 262: 34-40, (2015)

Yapay Sinir Ağları ile Dinamik Ağırlık Tahmin Uygulaması

Mehmet YUMURTACI*, İsmail YABANOVA

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Afyon

(Geliş/Received : 27.05.2016 ; Kabul/Accepted: 06.10.2016)

ÖZ

Üretim kapasitelerinin hızla arttığı günümüzde üretilen ürünlerin hızlı bir şekilde tartımı önemli bir konu haline gelmiştir. Bu hız ihtiyacından dolayı da ürünlerin tartım platformu üzerinde durdurulmadan tartılması gerekmektedir. Ürünlerin tartım platformu üzerinde durdurulmadan hareket halinde iken tartılması işlemine dinamik tartım denmektedir. Ancak dinamik tartım sistemlerinde tartılan ürünün hareketli olmasından dolayı ölçüm sinyali gürültülü olmaktadır. Ürünün ağırlığının belirli bir süre içerisinde tespit edilebilmesi için çeşitli yöntemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu çalışmada hareket halinde tartılan ürünlerin ağırlıklarının tahminini gerçekleştirmek için yapay sinir ağları kullanılmıştır. Ölçüm sisteminden alınan ağırlık verileri ile yapay sinir ağı eğitilmiş ve daha sonra ağırlık performansı test verileri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde dinamik ölçüm sistemlerinde ağırlık tahmininin yapay sinir ağları ile başarılı bir şekilde yapılabileceği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Dinamik Tartım, Yapay Sinir Ağları, Yük Hücresi.

Dynamic Weight Estimation Application with Artificial Neural Networks

ABSTRACT

In our day when the capacities of manufacturing have increased rapidly, also the speedy weighting of manufactured products has become an important subject. Because of this speed requirement, the products must be weighted on the weighing platform without being stopped. The weighting process of products in motion on the weighing platform without being stopped is called as dynamic weighting. However, in the dynamic weighting systems, the measurement signal is noisy as the weighted product is in motion and various methods must be used to determine the weight of product within a definite period of time. In this study, artificial neural networks were used to predict the weights of the weighted products in motion. The artificial neural network was trained with the weight data taken from the measurement system and then, performance of the network was evaluated with the test data. When the results were assessed, it has been determined that the weight prediction could be made successfully with the artificial neural networks in the dynamic measurement systems.

Keywords: Dynamic Weighing, Artificial Neural Networks, Load Cell.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknoloji ve artan insan nüfusuna bağlı olarak günümüzde üretim kapasiteleri de doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu kapasite artışından dolayı üreticilerin pazar payı bulabilmeleri için tüketiciye daha kaliteli ve standart ürünler sunmaları gerekliliği ortaya çıkmıştır. Üretilen ürünlerin belirli ağırlık standartlarında olması istenen durumlar için çeşitli ölçüm sistemleri geliştirilmiştir. Bunlardan birincisi statik tartımdır. Statik tartım ürünlerin tartım yapılacak olan platform üzerine sabitlenmesi ile yapılan tartımdır. Ancak üretim kapasitesinin yüksek olduğu ve bundan dolayı da tartım hızının yüksek olması istenen uygulamalarda ürünleri durdurmadan hareket halinde tartmak daha ekonomik olmaktadır [1]. Ürünlerin tartım platformu üzerinde durdurulmadan hareket halinde iken tartılması ise

dinamik tartım olarak tanımlanmaktadır. Ancak ürünlerin dinamik olarak tartılması sırasında oluşan mekanik titreşimler bozucu etkiye neden olmaktadır [2,3]. Bu istenmeyen bozucu gürültünün ölçüm sinyali üzerindeki etkisi hareketli sistemin hızına ve ölçülecek olan ürünün ağırlığına göre değişmektedir [4]. Tartım sistemlerinde yük hücreleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Yük hücreleri salınımlı sönüm yanıtına sahiptirler. Yük hücresinin yanıtı ve dinamik tartım sistemindeki titreşimlerin neden olduğu düşük frekanslı bozucu etkinin birleşmesi ile ölçüm sinyalinden gerçek ağırlık değerinin tespiti oldukça güçleşmektedir [3]. Geleneksel olarak dinamik tartım sistemlerinde yük hücresinden alınan analog sinyal öncelikle yükseltilmektedir. Yükseltile bu analog sinyal Σ - Δ analog dijital dönüştürücüler kullanılarak sayısal sinyale çevrilmektedir. Sayısal sinyale çevrilen bu ağırlık verisi filtreler yardımı ile veya çeşitli akıllı yöntemler kullanılarak filtrelenmektedir. Filtrelenerek gürültü sinyalinden ayrılan bu sinyale yine bir metot uygulanarak tartılan nesnenin ağırlığının stabil olduğu an

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: mehmetyumurtaci@aku.edu.tr

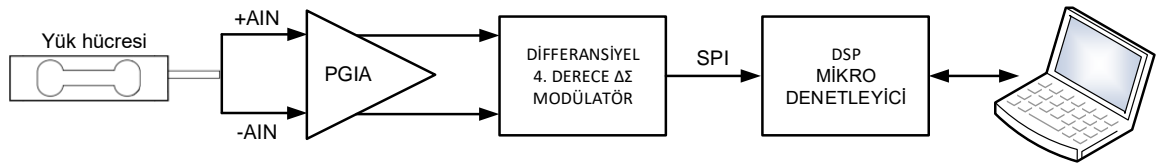
Dijital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 37-41

belirlenmektedir. Literatürde çeşitli yöntemler kullanılarak dinamik tartım sistemlerindeki bu gürültülerin elimine edilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu yöntemler; adaptif filtre [1, 5, 6], dalgacık dönüşümü [7-9], model tabanlı [3], sistem tanıma [10], yapay sinir ağları [11-12], bulanık mantık [13], ANFIS [14], zamanla değişen filtre parametreleri [4] başlıkları altında toplanabilir. Bahar'ın [12] yaptığı çalışmada dinamik tartım sisteminde ağırlık tahmini için yapay sinir ağları kullanılmıştır. Giriş katmanında 200, gizli katmanda 100 ve çıkış katmanında 1 nöron olmak üzere toplamda 301 nöron kullanılmıştır. Yapay sinir ağının eğitiminde ölçüm periyodu boyunca alınan 200 adet verinin tamamı kullanılmıştır. Almodarresi Yasin' in [11] yaptığı çalışmada dinamik tartım için yapay sinir ağları ve özellik çıkarıcı kullanarak yeni bir metod sunulmuştur. Özellik çıkarıcı yapay sinir ağlarından önce kullanılmış ve bu sayede yapay sinir ağlarında kullanılması gereken nöron sayısının ve hesaplama karmaşıklığının azaltıldığından bahsedilmiştir.

Yapılan çalışmalarda ölçüm sinyalinden gürültünün ayırt edilmesinde çoğunlukla alçak geçiren sonlu darbe cevaplı (FIR-Finite Impulse Response) filtreler kullanılmıştır. Ancak bazı çalışmalarda dinamik tartım sistemlerindeki hız gereksiniminden dolayı bu filtrelerin yeterli olmayacağından bahsedilmiş ve zamanla değişen filtre parametreleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bunun gerekçesi olarak da düşük kesim frekansları filtrelenmiş sinyalin yükselme zamanını arttırdığından ve gecikmeye neden olduğundan tartım sisteminin hızının düştüğünden, yüksek kesim frekanslarının ise filtrelenmiş sinyalin yükselme zamanını azalttığından fakat ölçüm sinyalinin istenilen düzeyde filtrelenmediğinden bahsedilmiştir. Bu çalışmada hareket halindeki ürünlerin ağırlıklarının belirlenmesinde yapay sinir ağları kullanılmıştır. Ölçüm sisteminden saniyede 100 veri alınmaktadır. Yapay sinir ağının eğitimi ürünün platforma düştüğü andan sonra alınan ilk 20 adet veri ile yapılmıştır. Eğitim ve test verilerinin sonuçları değerlendirildiğinde yapay sinir ağlarının dinamik tartım sistemlerinde ağırlık tahmini işleminde başarı ile kullanılabilceği görülmüştür.

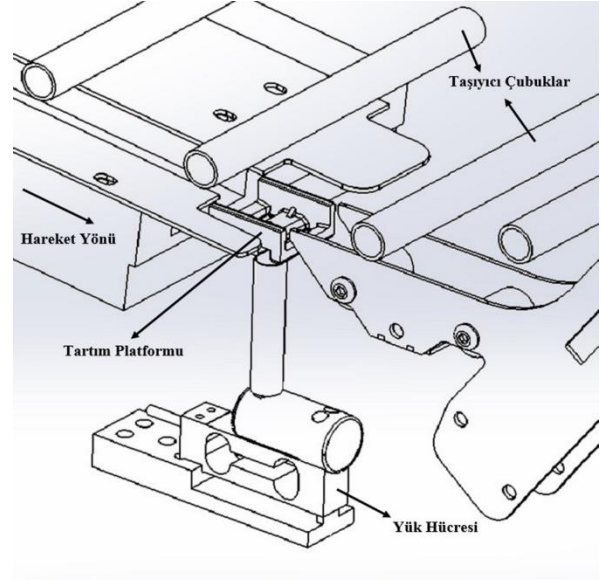
2. DİNAMİK TARTIM SİSTEMİ (DYNAMIC WEIGHING SYSTEM)

Tasarlanan tartım sistemi yuvarlak forma sahip (yumurta vb.) ürünlerin tartımını gerçekleştirecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 1' de tasarlanan dinamik tartım



Şekil 1. Dinamik tartım sistemi blok diyagramı (Dynamic weighing system block diagram)

vasıtasıyla eğimli bir yüzey üzerinden yuvarlanarak yatay olarak konumlandırılmış yük hücresi platformu üzerinden geçmektedirler. Yük hücresi platformu üzerine geldiklerinde hızlarındaki azalmadan dolayı taşıyıcı çubuklar ile olan temasları ortadan kalkmakta ve ağırlık ölçümünü etkileyecek bir kuvvete maruz kalmadan yük hücresi platformundan geçmektedirler. Bu sayede tartılmak istenen ürün durdurulmadan hareket halinde iken tartılmakta ve istenilen tartım hızlarına ulaşılmaktadır.



Şekil 2. Dinamik tartım sistemi (Dynamic weighing system)

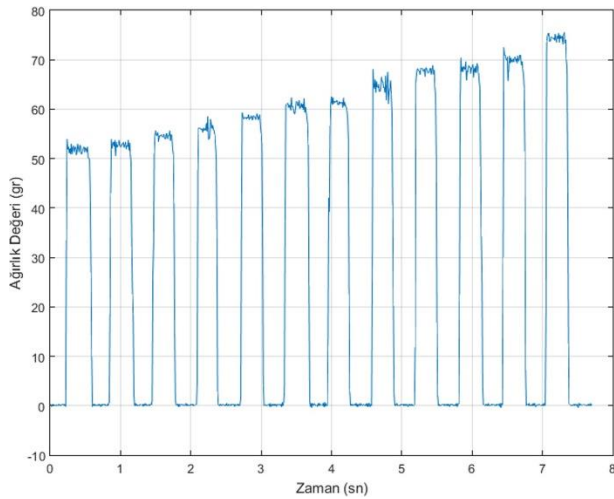
Geliştirilen ölçüm sisteminin elektronik kısmında mikrodenetleyici tabanlı bir kart tasarlanmıştır. Bu kart sayesinde yük hücresinden alınan analog ağırlık sinyal verisi yükseltilip diferansiyel $\Delta\Sigma$ modülatör ile dijital sinyal verisine çevrilmektedir. Ardından seri haberleşme arabirimi üzerinden mikrodenetleyici tarafından okunmaktadır. Elde edilen bu dijital sinyale gerekli hesaplamalar uygulanarak ürünlerin ağırlık verileri elde edilmektedir. Şekil 2'de dinamik tartım sistemi blok diyagramı verilmiştir

3. DENEYSEL ÖLÇÜMLER VE YAPAY SINIR AĞLARI UYGULAMASI (EXPERIMENTAL MEASUREMENT AND NEURAL NETWORK APPLICATIONS)

Geliştirilen dinamik tartım sistemi ile ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle farklı ağırlıklardaki

sistemi verilmiştir. Tartılacak ürünler taşıyıcı çubuklar yumurtalar durağan halde tartım platformunun üstüne

konularak ağırlıkları belirlenmiştir. Daha sonra yumurtalar ağırlıkları küçükten büyüğe doğru sıralanarak tartım platformu üzerinden hareket halinde geçerken ağırlık sinyali kayıt edilmiştir. Yumurtaların ağırlıklarının küçükten büyüğe doğru sıralanarak dinamik tartımının yapılmasının sebebi ise hangi ağırlık sinyalinin hangi yumurtaya ait olduğunun rahatlıkla bulunabilmesi içindir. Dinamik olarak tartılan 12 adet yumurtanın ağırlık ölçümlerine ait sinyal Şekil 3' te verilmiştir. Dinamik tartım sistemindeki titreşimler ölçüm sinyali üzerinde bozucu etkiye neden olmaktadır. Bundan dolayı ürünlerin net ağırlıklarının belirlenmesi mümkün olamamaktadır.



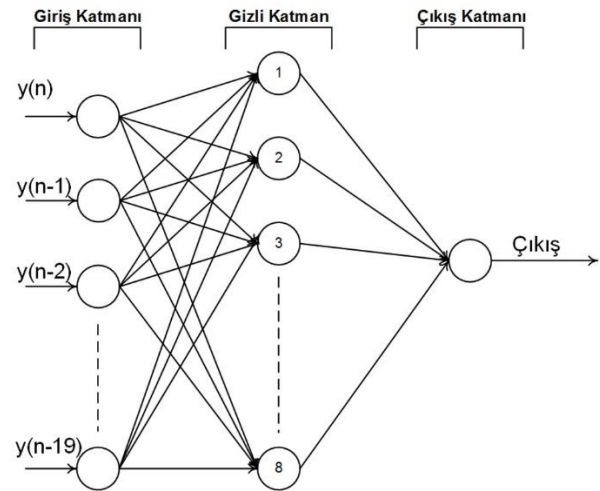
Şekil 3. 12 adet farklı yumurtanın ölçüm sinyali (Measurement signal of 12 different egg)

Dinamik tartım sisteminden veri alınırken 50, 100, 150 ve 200 Hz gibi farklı örnekleme frekansları denenmiştir. Kullanılan entegrenin veri sayfası incelendiğinde örnekleme frekansının artırılması ile RMS gürültü değerinin de arttığı açıkça görülmektedir. Bundan dolayı örnekleme frekansının dinamik ölçüm sisteminin ihtiyacını karşılayacak minimum frekans seçilmesinde fayda vardır. Sistemimiz için en uygun örnekleme frekansının 100 Hz olduğu tespit edilmiştir. Dinamik tartım sisteminin mevcut hızında ürünün platforma girişi ve çıkışı arasında geçen sürede 100 Hz örnekleme frekansında yaklaşık olarak 40 adet veri alınabilmektedir. Bundan dolayı yük hücrelerine yumurtanın girdiği andan itibaren ilk 20 adet analog ağırlık verisi yapay sinir ağının giriş verisini oluşturmaktadır. Böylece ürünün ağırlığı tartım platformuna girdiği andan itibaren mümkün olan en kısa sürede platformdan çıkmadan tahmin edilebilecektir.

İnsan beyninin bilgi işleme yapısından faydalanılarak yapay sinir ağları geliştirilmiştir. Geliştirilen bu sistemde beyindeki nöronların çalışma şekli taklit edilmiştir. Yapay sinir ağları insan beynindeki sinir hücrelerinde bulunan ve birbirlerine bağlı olan nöronlardan oluşturulmuşlardır. İnsan beyni yaşayarak elde ettiği deneyimler sayesinde öğrenir. Yapay sinir ağları matematiksel yöntemlerin aksine insan beynine benzer

şekilde giriş ve çıkış verileri arasındaki ilişkiyi eğitilerek öğrenebilmektedir [15]. Yapay sinir ağları öğrenme, veriler arasındaki bağıntıyı bulma ve hafızaya alma gibi özelliklere sahiptirler. Yapay sinir ağlarında genel olarak giriş, gizli ve çıkış katmanları olmak üzere üç katman bulunmaktadır. Her bir katmanda bulunan belirli sayıda nöronlar diğer katmanlardaki nöronlarla bağlantılıdır. Bir nörondan diğer nörona giden sinyal ağırlık denilen bir sayı ile çarpıldıktan sonra diğer nörona ulaşmaktadır. Ağ eğitildikçe bu ağırlıklar daha uygun sonucu elde etmek için güncellenirler. Nörona gelen bu sinyaller bir aktivasyon fonksiyonundan geçirilerek nöronun çıkış sinyali oluşturulmaktadır. Veriler ilk olarak giriş katmanına girilir, sonra sırasıyla gizli katman ve çıkış katmanını takip ederek çıkış verisi elde edilir.

Yapay sinir ağları, MATLAB programı içerisinde yer alan Neural Network Fitting Tool (nftool) arayüzü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İleri beslemeli geri yayımlı ağın eğitiminde Levenberg-Marquardt algoritması kullanılmaktadır. Gerçekleştirilen çalışmada giriş, gizli ve çıkış katmanları olmak üzere üç katmanlı ileri beslemeli ağ kullanılmıştır. Gizli katmanda sigmoid, çıkış katmanında ise lineer aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Giriş katmanında 20, gizli katmanda 8 ve çıkış katmanında 1 nöron bulunmaktadır. Oluşturulan ağ yapısı ve giriş çıkışlar Şekil 4' te verilmiştir.



Şekil 4. Oluşturulan ağın yapısı (Structure of generated network)

Bu çalışmada farklı ağırlıklardaki 12 adet yumurta kullanarak 5 kez ölçüm sinyali alınmıştır. Tartılacak her bir ürün platform üzerine düştükten sonraki ilk 20 adet veri kullanılarak yapay sinir ağı eğitilmiş ve daha ürün tartım platformundan ayrılmadan ağırlığı belirlenebilmiştir. Ağın eğitimi sonucunda elde edilen performans değerleri Çizelge 1' de verilmiştir. Ölçüm verilerinden eğitim, değerlendirme ve test verilerinin seçimi rast gele yapılmıştır.

Çizelge 1. Yapay sinir ağının eğitim, doğrulama ve test sonuçları (Artificial neural network 's training, validation and test results)

	Örnek Sayısı	MSE	R ²
Eğitim	42	4.276x10 ⁻²⁰	0.9999
Doğrulama	9	2.231x10 ⁻⁴	0.9998
Test	9	4.304x10 ⁻⁴	0.9995

Ağın eğitimi sırasında 9 adet veri test amaçlı kullanılmıştır. Test verisi olarak ayrılan 9 adet yumurta verisinin durağan halde ölçülen gerçek ağırlıklarıyla ağın tahmin ettiği ağırlıkları Çizelge 2’ de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ağın eğitiminde kullanılmayan bu veriler ile yapay sinir ağının denenmesi sonucunda elde edilen hata değerleri çok küçük olduğundan dolayı yapay sinir ağlarının dinamik tartım sistemlerinde ağırlık tahmininde başarılı bir şekilde kullanılacağı görülmüştür.

Çizelge 2. Gerçek ağırlık değerleri ve test verilerinden tahmin edilen ağırlık değerleri (Actual weight values and estimated weight values from test datas)

Gerçek Yumurta Ağırlıkları (gr)	Tahmin Edilen Yumurta Ağırlıkları (gr)	Hata (gr)
54.6	54.79	-0.19
67.8	67.73	0.07
54.6	54.67	-0.07
74.5	74.23	0.27
56.1	55.78	0.32
58.4	58.48	-0.08
51.9	51.62	0.28
61.2	61.57	-0.37
68.1	67.86	0.24

Yine ağın performansını test etmek amacıyla ağın eğitim, doğrulama ve test aşamalarında hiç kullanılmayan veriler ile ağın performansı denenmiştir. Çizelge 3’ te verilen sonuçlara göre yapay sinir ağı dinamik tartım işlemindeki ürün ağırlıklarını çok küçük hatalar ile doğru bir şekilde tahmin etmiştir

Çizelge 3. Ağın eğitim, doğrulama ve test işlemlerinde kullanılmayan veriler ile test edilmesi (Network testing with unused datas different from training, validation and testing datas)

Gerçek Yumurta Ağırlıkları (gr)	Tahmin Edilen Yumurta Ağırlıkları (gr)	Hata (gr)
53	52.95	0.05
56.5	56.22	0.28
62.4	62.31	0.09
63.1	63.05	0.05
70.4	70.60	-0.2

4. SONUÇ (RESULT)

Günümüzde ürünlerin hızlı ve doğru bir şekilde tartılması gerekmektedir. Bundan dolayı dinamik tartım sistemleri geliştirilmiş ve bu alanda birçok çalışma yapılmıştır. Dinamik tartım sistemlerinde ürünlerin hareket halinde olmasından dolayı ölçüm sinyali üzerinde titreşimlerin

oluşturduğu düşük frekanslı bozucu etki meydana gelmektedir. Bu gürültünün ölçüm sinyalinden temizlenmesi için birçok yöntem kullanılmıştır. Yapılan bu çalışmada yapay sinir ağlarının dinamik tartım sistemlerinde başarı ile kullanılabilirliği görülmüştür. Gerçekleştirilen yapay sinir ağı çok küçük hatalar ile daha tartılan ürün tartım platformundan ayrılmadan ürünün ağırlığını belirleyebilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Niedźwiecki, M. and Wasilewski, A., “Application of adaptive filtering to dynamic weighing of vehicles”, *Control Engineering Practice*, 4(5): 635-644, (1996).
- [2] Yamazaki, T., Sakurai, Y., Ohnishi, H., Kobayashi, M. and Kurosu, S., “Continuous mass measurement in checkweighers and conveyor belt scales”, *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, Osaka, 470-474, (2002).
- [3] Boschetti, G., Caracciolo, R., Richiedei, D. and Trevisani, A., “Model-based dynamic compensation of load cell response in weighing machines affected by environmental vibrations”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 34(1-2): 116-130, (2013).
- [4] Pietrzak, P., Meller, M. and Niedźwiecki, M., “Dynamic mass measurement in checkweighers using a discrete time-variant low-pass filter”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 48(1-2): 67-76, (2014).
- [5] Jafaripannah, M., Al-Hashimi, B.M. and White, N.M., “Dynamic sensor compensation using analogue adaptive filter compatible with digital technology”, *in Circuits, Devices and Systems, IEE Proceedings*, 152(6): 745-751, (2005).
- [6] Halimic, M., and Balachandran, W., “Kalman filter for dynamic weighing system”, *in Industrial Electronics, 1995. ISIE '95., Proceedings of the IEEE International Symposium on*, Athens, 2: 786-791, (1995).
- [7] Jian, X., and Bin, M., “Investigation of discrete wavelet transform for signal de-noising in weight-in-motion system”, *Future Computer and Communication (ICFCC), 2010 2nd International Conference on*, Wuhan, 2: 769-772, (2010).
- [8] Xiao, J. and Lv, P., “Application of wavelet transform in weigh-in-motion”, *Intelligent Systems and Applications, 2009. ISA 2009. International Workshop on*, Wuhan, 1-4 (2009).
- [9] Bin, M. and Xinguo, Z., “Discrete wavelet transform for signal processing in weight-in-motion system”, *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010 International Conference on*, Wuhan, 4668-4671, (2010).
- [10] Zhang, Y. and Fu, H., “Dynamic weighing signal processing by system identification”, *in Industrial Mechatronics and Automation (ICIMA), 2010 2nd International Conference on*, Wuhan, 2: 203-206, (2010).
- [11] Almodarresi Yasin, S.M.T. and White, N.M., “Application of artificial neural networks to intelligent weighing systems”, *in Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings*, 146(6): 265-269, (1999).

- [12] Bahar, H.B. and Horrocks, D.H., “Dynamic weight estimation using an artificial neural network”, *Artificial Intelligence in Engineering*, 12 (1–2): 135-139, (1998).
- [13] Halimic, M., Balachandran, W. and Enab, Y., “Fuzzy logic estimator for dynamic weighing system”, *in Fuzzy Systems, Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on*, New Orleans, LA, 3: 2123-2129, (1996).
- [14] Halimic, M., Halimic, A., Zugail, S. and Huneiti, Z., “Intelligent signal processing for electro-mechanical systems”, *in Mechatronics and Its Applications, 5th International Symposium on*, Amman, 1-5, (2008).
- [15] Yabanova, İ. and Keçebaş, A., “Development of ANN model for geothermal district heating system and a novel PID-based control strategy”, *Applied Thermal Engineering*, 51(1-2): 908-916, (2013).

AISI 304 ve AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliklerin İşlenebilirliğinin Değerlendirilmesi

Nursel ALTAN ÖZBEK¹, Adem ÇİÇEK², Mahmut GÜLESİN³, Onur ÖZBEK^{4*}

¹ Düzce Üniversitesi, Cumayeri Meslek Yüksekokulu, Düzce

²Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak., Makine Müh. Böl. Ankara

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara

⁴Düzce Üniversitesi, Gümüşova Meslek Yüksekokulu, Düzce

(Geliş/Received : 08.05.2016 ; Kabul/Accepted: 15.06.2016)

ÖZ

Bu çalışmada AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğini değerlendirmek amacıyla kaplamasız tungsten karbür kesici takımlar kullanılarak tornalama deneyleri yapılmıştır. Deneyler, kuru kesme şartlarında sabit kesme derinliği (2,4 mm), dört kesme hızı (100, 120, 140 ve 160 m/dak) ve üç ilerleme hızında (0,15, 0,3 ve 0,45 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. AISI 304 ve AISI 316 çeliklerin işlenebilirliği takım aşınması, esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmiştir. Deney sonuçları AISI 316 çeliğinin işlenmesinde kesici takımın daha fazla aşındığını göstermiştir. Ayrıca AISI 316 çeliğinde daha yüksek kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Deneysel çalışma sonunda, AISI 316 çeliğinin AISI 304 çeliğine kıyasla işlenebilirliğinin zor olduğu ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Paslanmaz Çelikler, Takım Aşınması, Kesme Kuvveti, Yüzey Pürüzlülüğü.

Evaluation of Machinability of AISI 304 and AISI 316 Austenitic Stainless Steels

ABSTRACT

In this study, turning tests were performed to assess machinability of AISI 304 and AISI 316 austenitic stainless steels using uncoated tungsten carbide tools. The tests were conducted at four cutting speeds (100, 120, 140 and 160 m/min), three feed rates (0.15, 0.3 and 0.45 mm/rev), and a fixed depth of cut (2.4 mm) under dry cutting conditions. Machinability of AISI 304 and AISI 316 steels was evaluated in terms of tool wear, main cutting force and surface roughness. Experimental results showed that larger wear damages formed on the cutting inserts used for machining of AISI 316 steel. In addition, higher values of cutting forces and surface roughness were measured in machining of AISI 316 steel. In consequence of experimental study, it was found that AISI 316 steel had harder machinability characteristics than AISI 304 steel.

Keywords: Austenitic Stainless Steels, Tool Wear, Cutting Force, Surface Roughness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Endüstride geniş kullanım alanına sahip olan paslanmaz çelikler, içerisinde en az % 10,5 oranında (kütlece) krom (Cr) ve en çok % 1,2 oranında karbon (C) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanırlar. Bu çelikler, korozif ortamlarda çalışacak makine ve yapı elemanlarının en önemli malzemesi olmakla birlikte; üstün mekanik özellikleri sayesinde, uçak, kimya, petro-kimya, gıda, ilaç endüstrisinde, nükleer enerji santrallerinde, takım ve paslanmaz eşya endüstrisinde geniş kullanım alanına sahiptirler [1-4]. Toplam paslanmaz çelik üretimi içinde östenitik paslanmaz çeliklerin payı % 70'tir [5]. Bu grup en yaygın kullanılan çelik grubudur. Östenitik paslanmaz çeliklerin diğer paslanmaz çeliklere göre korozyon direnci açısından önemli üstünlükleri vardır [6]. Östenitik paslanmaz çelikler 200 ve 300 serilerini içerirler ve temel alaşım elementleri krom ve nikelidir. Bu alaşımlar, geniş bir sıcaklık aralığında sahip oldukları

yüksek tokluk ve yüksek dayanım değerleri ile ön plana çıkarlar ve 540 °C'ye kadar ki sıcaklıklarda oksidasyona karşı dayanım gösterirler. Bu grupta yer alan malzemelerin başında 302, 304, 310, 316, 321 ve 347 sınıf paslanmaz çelikler gelmektedir [1]. Yüksek süneklikleri, pekleşme eğilimleri ve düşük ısı iletkenlikleri nedeniyle östenitik paslanmaz çelikler kesici takımlarda farklı aşınma tiplerinin hızlı bir şekilde ortaya çıkmasına neden olabilmektedirler [6]. Bu sebeple, paslanmaz çelikler hala yapısal mühendislik problemlerinin pahalı bir çözümü olarak görülmekte ve bu durum daha fazla kullanımını engellemektedir [7].

Bu çelikleri işlenebilirlik karakteristiklerini iyileştirmeye yönelik birçok çalışma yapılmış ve bunlardan önemli olanları şunlardır: Ranganathan ve arkadaşları, AISI 316 paslanmaz çeliğinin tungsten karbür uçlarla tornalanmasında, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme parametrelerinin (kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği) etkilerini çalışmışlardır. Regresyon analizi ve ANOVA analizini kullanarak yaptıkları bu çalışmada takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerinde

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: onurozbek@duzce.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 43-49

kesme hızının diğer kesme parametrelerinden (ilerleme hızı ve kesme derinliği) daha etkili olduğunu tespit etmişlerdir [8]. Selvaraj ve Chandramohan, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin kaplamalı tungsten karbür takımlar kullanılarak kuru tormalanmasında kesme hızı, ilerleme hızı ve kesme derinliği gibi kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sinyal gürültü oranı (S/N) ve ANOVA analizi kullanılarak yapılan çalışma sonucunda, yüzey pürüzlülüğü üzerine ilerleme hızının % 51,84, kesme hızının % 41,99 ve kesme derinliğinin % 1,66 oranında etkili olduğunu belirlemişlerdir [9]. Özek ve arkadaşları, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin tormalanmasında, kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliğinin yüzey pürüzlülüğü, takım yan yüzey aşınması ve takım-talaş ara yüzey sıcaklığına olan etkilerini incelemişlerdir. Deneysel neticesinde, kesme hızının artmasıyla, takım-

yaygın kullanım alanına sahip olan bu iki östenitik paslanmaz çeliğin kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve daha önce çalışılmamış olan takım aşınması açısından işlenebilirliklerini değerlendirmek amacıyla kesme parametrelerinin farklı kombinasyonunda kesme deneyleri yapılmış ve deney sonuçları tartışılmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Yapılan deneysel çalışmada kullanılan AISI 304 ve AISI 316 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 1’de sunulmuştur. Deneylerde 100 mm çapında ve 250 mm uzunluğunda paslanmaz çelik çubuklar kullanılmıştır. Kesici takım olarak ISCAR tarafından üretilen SNMG 120412 – TF serisine ait kaplamasız tungsten karbür takımlar (IC20) kullanılmıştır.

Çizelge 1. Östenitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşenleri (Chemical compositions of the austenitic stainless steels)

Sınıf	%C	%Mn	%Si	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu
AISI 304	0,08	2	0,75	0,045	0,03	18,35	8,12	0,07	0,23
AISI 316	0,04	1,18	0,41	0,038	0,012	16,3	10,09	2,02	0,49

talaş ara yüzey sıcaklığının ve takım yan yüzey aşınmasının azaldığı; ilerleme hızı ve kesme derinliğinin artmasıyla yüzey kalitesinin kötüleştiği belirlenmiştir [10]. Korkut ve arkadaşları, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin tungsten karbür takımlarla tormalanmasında optimum kesme hızı değerini belirlemek için üç farklı kesme hızı kullanarak takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerine kesme hızının etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda kesme hızının artmasıyla takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir [11]. Çiftçi, AISI 304 ve AISI 316 çeliğinin işlenmesinde, kesici takım kaplamasının, kesme hızının ve iş parçası malzemesinin, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla kuru kesme şartlarında tormalama deneyleri yapmıştır. Deney sonuçlarında, AISI 316 paslanmaz çeliğin tormalanması esnasında oluşan kesme kuvvetlerinin, AISI 304 paslanmaz çeliğin tormalanması esnasında oluşan kesme kuvvetlerinden daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Ayrıca kesme hızının kesme kuvvetlerinde önemli derecede bir değişikliğe neden olmadığı ancak yüzey pürüzlülüğünü önemli derecede etkilediği görülmüştür [12]. Yeyen ve arkadaşları, AISI 303 östenitik paslanmaz çelik ile AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin işlenebilirliğini karşılaştırdıkları çalışmada; AISI 303’ün işlenmesi sırasında AISI 304’e göre %19 daha fazla kesme kuvvetleri ve %51 daha fazla yüzey pürüzlülüğü ölçüldüğünü tespit etmişlerdir [13].

AISI 316 çeliği, AISI 304 çeliği ile benzer kimyasal bileşime sahip olmakla beraber AISI 316 çeliğinin kimyasal bileşiminde AISI 304’e göre molibden ve nikel oranı daha yüksektir (Çizelge 1). Bu alaşım elementleri sayesinde, AISI 316 çeliğin kopma dayanımı, AISI 304 çeliğe oranla daha yüksektir. Bu çalışmada, endüstride

Kesme deneyleri, sabit kesme derinliği (2,4 mm), dört farklı kesme hızı (100, 120, 140 ve 160 m/dak) ve üç farklı ilerleme hızında (0,15; 0,3 ve 0,45 mm/dev) gerçekleştirilmiştir. Tormalama deneyleri kuru kesme şartları altında Johnford TC35 tipi CNC torna tezgâhı kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde, Kistler 9257 B model dinamometre kullanılarak esas kesme kuvveti değerleri (Fc) ve Mahr M1 marka profilometre cihazı kullanılarak yüzey pürüzlülüğü değerleri (Ra) ölçülmüştür. Kesici takım aşınma miktarlarının ölçümü ise, Dino-Lite dijital mikroskop kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Belirli aralıklarda kesme işlemi durdurulmuş ve mikroskop ile kesici takımların aşınan yüzeylerinin fotoğrafı çekilerek yan yüzey aşınma miktarları ölçülmüştür. Krater derinlikleri 1 µm hassasiyete sahip Mahr marka Conturograph ile ölçülmüştür. Çalışmada, esas kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünün doğru değerlerini elde etmek amacıyla kesme parametrelerinin her bir kombinasyonunda kesme deneyleri üç kez tekrarlanmış, her parametrede üç ölçüm yapılmış ve bunların aritmetik ortalaması alınarak esas değerler belirlenmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

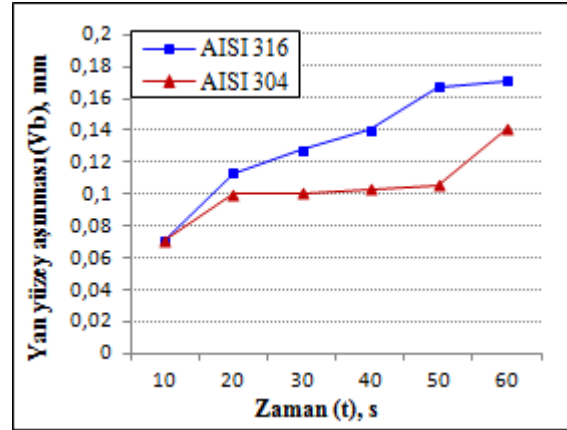
3.1. Takım Aşınması (Tool Wear)

Şekil 1’de AISI 304 ve AISI 316 çeliklerinin zamana bağlı yan yüzey aşınmasındaki değişim grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde; AISI 304 çeliğinin işlenmesinde daha düşük yan yüzey aşınması değerlerinin ölçüldüğü görülmektedir (Şekil 1). Bu durumun iki malzemenin kimyasal bileşimindeki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 1’de

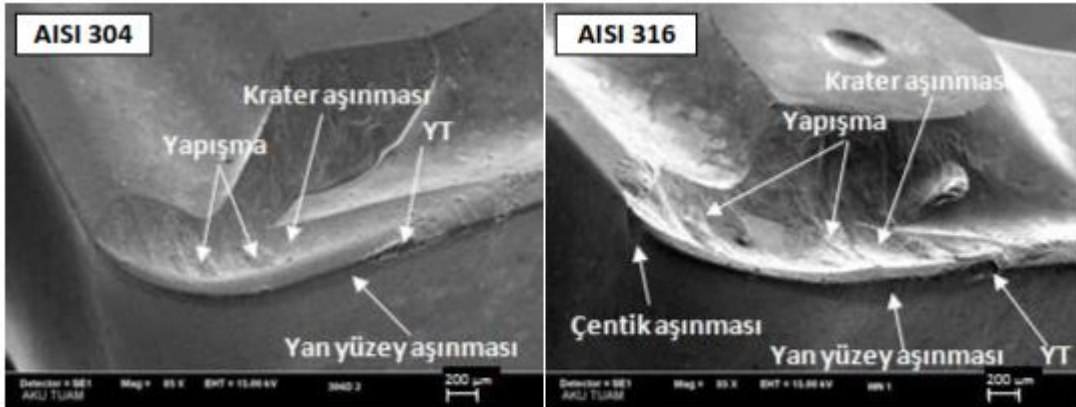
AISI 304 çeliğinden farklı olarak AISI 316 çeliğinin kimyasal bileşiminde % 2 oranında molibden (Mo) olduğu görülmektedir. Mo elementinin çeliklerde sıcak sertliği ve aşınma direncini artırdığı; bu sebeple de işlenebilirliği olumsuz yönde etkilediği bilinmektedir [6, 12]. Sahip olduğu yüksek sıcak sertlik ve aşınma direnci sebebiyle AISI 316 çeliğin işlenmesinde kullanılan kesici takımın daha fazla aşınmasına sebep olmaktadır. Grafikte, her iki malzeme için de artan kesme zamanıyla birlikte kesici takım aşınmasının da arttığı görülmektedir. Kesme işleminin sonunda AISI 316 çeliğine kıyasla AISI 304 çeliğinde %18 oranda daha az aşınma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca her iki malzemenin işlenmesinde de kesici takımlarda da krater aşınmasının olduğu gözlenmiştir (Şekil 2). Krater derinliği, AISI 316 çeliğinin işlendiği takımda 0,158 mm ölçülürken, AISI 304 çeliğinin işlendiği takımda 0,053 mm olarak ölçülmüştür. AISI 304 çeliğinin işlenmesinde % 67 oranında krater derinliği azalmıştır.

Kesici takımların aşınma mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi amacıyla Şekil 2’de kesici takımların SEM fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde; her iki malzemenin işlenmesinde de abrasiv aşınma mekanizmasının sebep olduğu yan yüzey aşınmasının olduğu tespit edilmiştir. Yine her iki malzemenin işlenmesinde de kesici takımın kesme kenarında yığıntı talaş (YT) oluşumlarına rastlanmıştır. Sünek yapısı nedeniyle östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmeleri esnasında, iş parçası malzemesi ile kesici takım arasında temas bölgelerinde çok güçlü bir yapışma eğilimlerinin olduğu bilinmektedir [6]. Kesici takımların talaş

ve iş parçası ve takım malzemesinin kimyasal ilgisine bağlıdır. Dolayısı ile krater aşınması yüksek kesme hızlarında en büyük değerine ulaşır [6]. Her iki paslanmaz çeliğin işlenmesinde de adhezyon ve oksidasyon aşınma mekanizmalarının ve iş parçası malzemesinin işlenen yüzeyinde plastik deformasyon sonucu gerçekleşen pekleşmenin sebep olduğu çentik aşınmasının kesici takımların kesme kenarlarında oluşmadığı, yalnızca AISI 316 çeliğinin işlendiği kesici takımın yardımcı kesme kenarında olduğu görülmüştür.



Şekil 1. AISI 304 ve AISI 316 çeliğinin işlenmesinde zamana bağlı yan yüzey aşınmasındaki değişim ($f = 0,45$ mm/dev, $V = 100$ m/dak) (The variation of flank wear versus cutting times in machining of AISI 304 and AISI 316 steels ($f = 0.45$ mm/rev, $V = 100$ m/min))



Şekil 2. Kesici takımların SEM fotoğrafları ($f = 0,45$ mm/dev, $V = 100$ m/dak) (SEM pictures of cutting tools ($f = 0.45$ mm/rev, $V = 100$ m/min))

yüzeylerinde abrasiv ve difüzyon aşınma mekanizmalarının sebep olduğu krater aşınması oluşmuş ve krater yüzeylerinde yığıntı katmanı şeklinde yapışmalar meydana gelmiştir. Tungsten karbür içerisinde çok miktarda bulunan karbon atomları, yüksek sıcaklık ve basıncın etkisiyle az yoğun ortam olan iş parçası malzemesine ve talaşa geçme eğilimi göstermektedir. Bu durum difüzyon aşınma mekanizmasının ortaya çıkmasına neden olur ve aşınma sonucu kesici ucun talaş yüzeyi üzerinde krater oluşur. Bu aşınma mekanizması önemli ölçüde sıcaklığa, basınca

3.2. Kesme Kuvvetleri (Cutting Forces)

Şekil 3’te AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin kaplamasız tungsten karbür takımlarla işlenmesinde kesme hızına bağlı esas kesme kuvvetlerindeki değişimi verilmiştir. Grafikler incelendiğinde üç ilerleme hızında da AISI 316 çeliğinin AISI 304 çeliğine kıyasla daha yüksek kesme kuvveti değerleri sergilediği görülmektedir. Bu durumun; AISI 316 çeliğinin kimyasal bileşimindeki Mo (molibden) elementi sayesinde sahip olduğu yüksek sıcak sertlik ve aşınma direncinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Mo

elementi 2610 °C [14] gibi yüksek ergime sıcaklığına sahip refrakter bir malzeme olması nedeniyle çeliğe yüksek sıcak sertlik özelliği, ayrıca karbür yapıcı bir olması nedeniyle daha iyi bir sertlik ve aşınma direnci kazandırmaktadır. Bu özelliklerin, çeliklerin talaşlı imalatında plastik deformasyonu zorlaştırdığı bilinmektedir. Ayrıca, AISI 316 çeliği 520 MPa çekme dayanımına sahip iken, AISI 304 çeliği 505 MPa çekme dayanımına sahiptir [15]. Bu sebeple, AISI 316 çeliği işlenirken daha büyük kesme kuvvetleri ölçülmüştür. Benzer şekilde Çiftçi de yaptığı çalışmada, AISI 304 çeliğine kıyasla AISI 316 çeliğin tornalanmasında daha yüksek kesme kuvveti değerleri ölçüldüğünü rapor etmiştir [12].

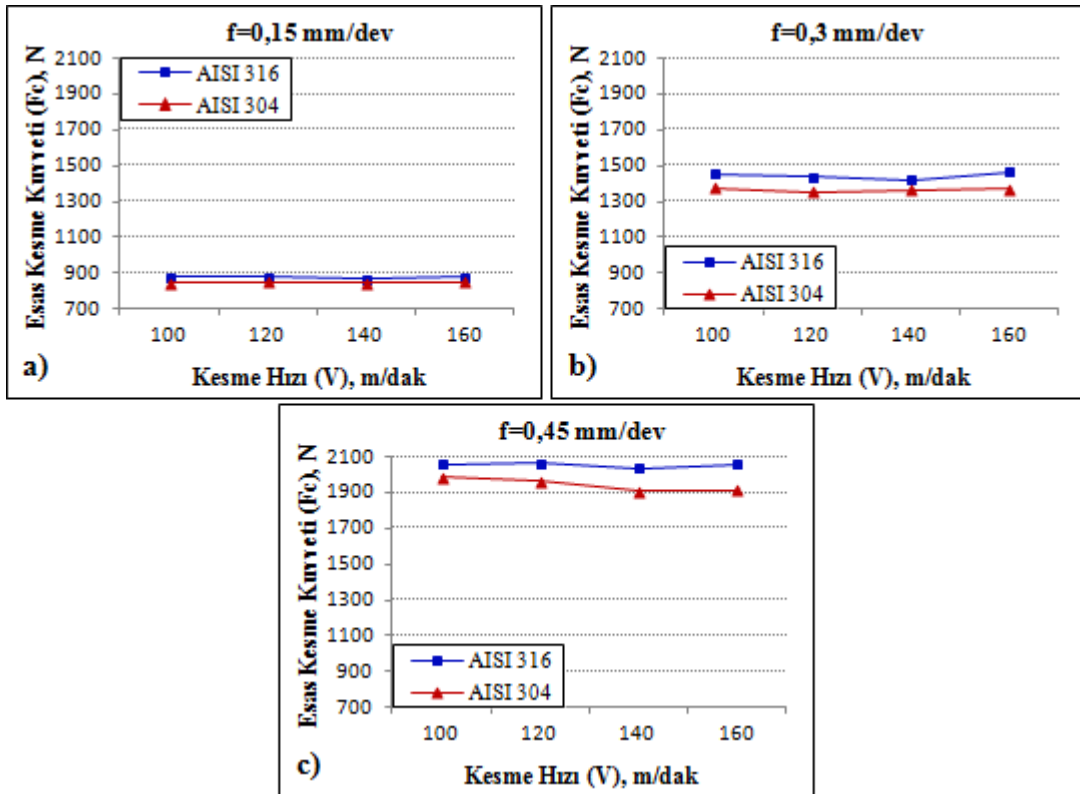
İki iş parçası malzemesi arasındaki esas kesme kuvveti (F_c) değerleri farkı 0,15 mm/dev ilerleme hızında en düşük değerlerde iken artan ilerleme hızıyla kesme kuvveti değerleri arasındaki fark da daha belirgin bir hale gelmiştir. Genel olarak tüm grafiklerde her iki malzeme için de 140 m/dak'ya kadar artan kesme hızı değerleriyle birlikte F_c değerleri düşmüş ancak kesme hızının daha da artırılarak 160 m/dak'ya çıkarılmasıyla F_c değerlerinde de bir miktar artış görülmüştür. Belirli bir değere kadar artan kesme hızıyla kesme kuvvetlerindeki bu düşüş, kesme bölgesinde oluşan yüksek sıcaklıklara bağlı olarak takım-talaş ara yüzeyindeki temas alanının azalması sonucu sürtünmenin azalması ve malzemenin akma dayanımının azalmasıyla açıklanabilir. Kesme hızının daha da artırılmasıyla artan kesme kuvveti ise kesici takım aşınmasının artması ile açıklanabilir [12, 16].

Şekil 3'deki grafikler incelendiğinde, kesme kuvvetlerinin artmasında ilerleme hızının kesme hızından daha etkili olduğu söylenebilir [17-19]. 0,15 mm/dev ilerleme hızında F_c değeri AISI 316 malzemesinde ortalama 875,21 N iken, ilerleme hızı % 200 artışla 0,45 mm/dev olduğunda F_c kuvvetlerinde % 135'lik bir artış meydana gelecek ortalama 2055,13 N olmuştur. AISI 304 malzeme ise ortalama 847,06 N olan F_c değeri, ilerleme hızındaki % 200'lük artışla ortalama % 130 oranında artarak 1944,23 N'a ulaşmıştır. İlerleme hızının kesme kuvveti değerleri üzerine bu etkisinin; ilerleme hızındaki artışla birlikte talaş kesitinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Talaş kesitinin artması takım-talaş temas alanı artırmaktadır. Böylece kesici takım yüzeyinde oluşan gerilmeler daha geniş bir alanda etkili olmaktadır [20, 21].

Diğer yandan artan ilerleme hızı ile iki malzeme arasındaki F_c kuvveti değerleri farkı da artmıştır. AISI 316 ile AISI 304 östenitik paslanmaz çeliği arasında ölçülen F_c kuvveti değerleri farkı 0,15 mm/dev ilerleme hızında % 3,3 (ortalama 28,15 N) iken, 0,3 ve 0,45 mm/dev ilerleme hızlarında bu fark ortalama % 5,7 (78,43 N) ve ortalama % 5,7 (110,71 N) olarak hesaplanmıştır.

3.3. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerin kesme hızına bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değişim grafiklerine bakıldığında; kesme kuvvetlerindeki gibi R_a değerleri üzerinde ilerleme

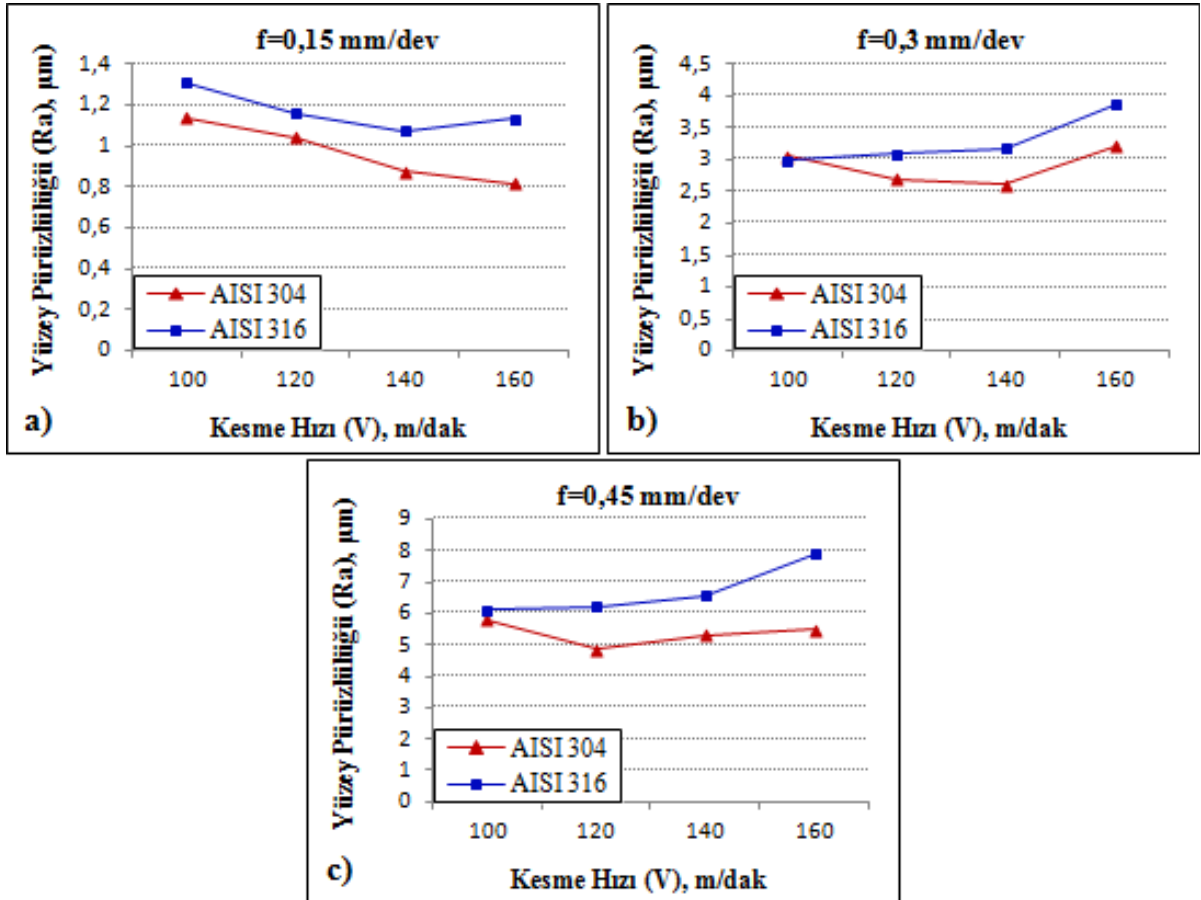


Şekil 3. Kesme hızına bağlı esas kesme kuvvetlerindeki değişim (The variation of main cutting forces versus cutting speed)

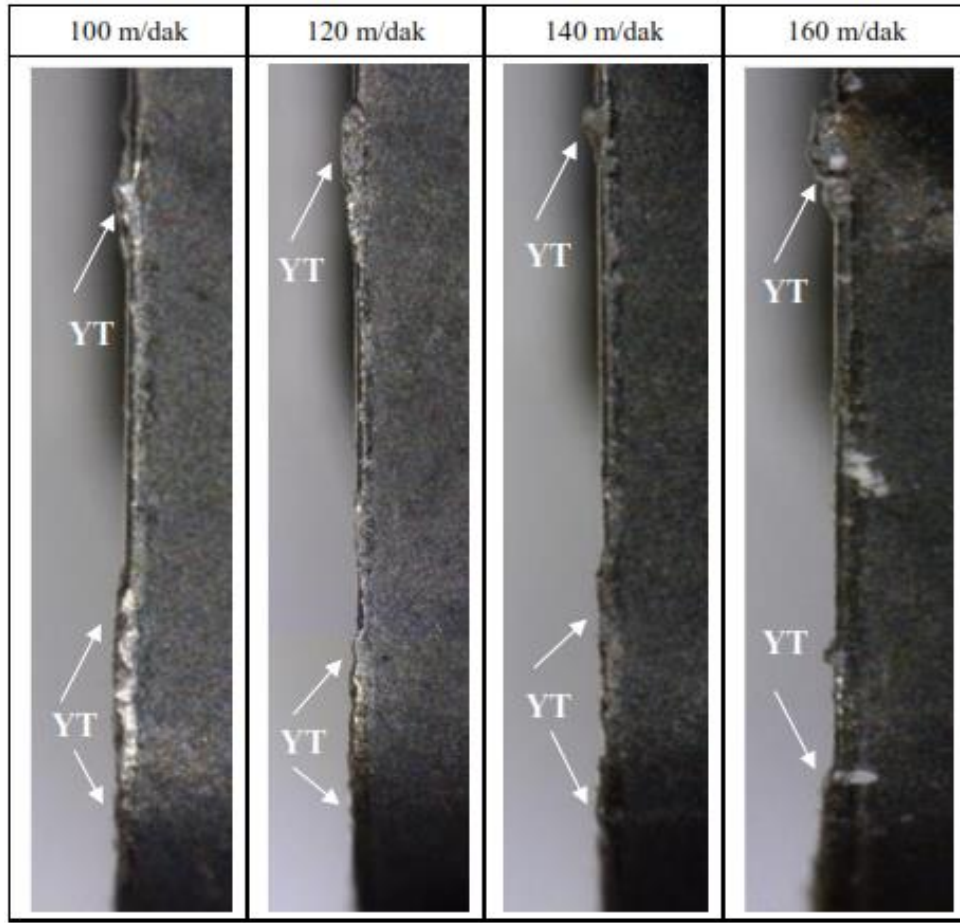
hızının kesme hızından daha etkili olduğu görülmektedir (Şekil 4). Diğer yandan iki iş parçası malzemesi arasındaki Ra değerleri farkı da F_c ye göre daha belirgindir. Bununla birlikte Şekil 3'deki gibi bu grafiklerde de genel olarak AISI 316 çeliği ile daha yüksek Ra değerleri elde edilmiştir. Bu durum AISI 304 çeliğine kıyasla AISI 316 çeliğinin işlenmesinde kesici takım aşınmasının ve kesme kuvvetlerinin daha fazla olmasına atfedilmiştir (Şekil 1). Bilindiği gibi aşınma ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğrudan bir ilişki vardır [22]. Ayrıca, yüksek kesme kuvvetleri mekanik titreşimlerin artmasına neden olmakta ve bu titreşimlerde yüzey pürüzlülüğünün artırmaktadır. Tüm kesme hızlarında AISI 316 çeliği ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri 1,076 – 7,888 μm aralığında iken, AISI 304 çeliği ile elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri 0,817 – 5,809 μm aralığındadır.

AISI 316 çeliği üzerinde ölçülen Ra değerlerinde 0,15 mm/dev ilerleme hızında 140 m/dak kesme hızına kadar belirgin bir azalma gözlenmiştir. Ancak kesme hızının 160 m/dak kesme hızına çıkarılmasıyla Ra değerlerinin arttığı gözlenmiştir. 140 m/dak kesme hızına kadar artan kesme hızıyla Ra değerlerinin azalması yığıntı talaş oluşma eğiliminin azalmasıyla açıklanabilir. Artan kesme hızıyla sıcaklığın artması [23, 24] kesici takımdaki

yığıntı talaşın sertliğini ve dayanımını kaybederek kesici takımdan uzaklaşmasına sebep olur (Şekil 5). Şekil 5'te verilen fotoğraflar incelendiğinde kesici takımların kesme kenarlarında oluşan yığıntı talaş miktarının artan kesme hızıyla azaldığı görülmektedir. Kesme hızının 160 m/dak'ya çıkarılmasıyla Ra değerlerinin artış göstermesi yüksek kesme hızlarında kesici takımın aşınması ile açıklanabilir. 0,3 ve 0,45 mm/dev ilerleme hızlarında ise; artan kesme hızıyla ölçülen Ra değerlerinin de artış eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Orta ve yüksek ilerleme hızlarında artan kesme hızıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artması; artan talaş kaldırma hızı ve sürtünme nedeniyle ortaya çıkan yüksek sıcaklıkların etkisiyle kesici takım aşınmasına atfedilmiştir. AISI 304 çeliğinde ise; 0,15 mm/dev ilerleme hızında artan kesme hızıyla Ra değerlerinin azaldığı görülmektedir. 0,3 ve 0,45 mm/dev ilerleme hızlarında ise bir değere kadar artan kesme hızıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin azaldığı ancak kesme hızının daha fazla artırılmasıyla yüzey pürüzlülüğü değerlerinin de arttığı gözlenmiştir. Benzer gözlemler Çiftçi [12] ve Tekaslan ve arkadaşları [25] tarafından da rapor edilmiştir. Yazarlar, bu durumu kesici takımda oluşan yan yüzey ve çentik aşınmalarına ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen diğer bir faktör olan talaş kökünde YT oluşma eğilimine atfetmişlerdir.



Şekil 4. Kesme hızına bağlı yüzey pürüzlülüğündeki değişim (The variation of surface roughness forces versus



Şekil 5. Kesme hızına bağlı yıgıntı talaştaki değişim (The variation of built-up-edge versus cutting speed)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Kaplamasız tungsten karbür takımlarla AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğinin işlenebilirliği üzerine yapılan deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- AISI 304 çeliğinin işlenmesinde daha düşük yan yüzey aşınması ve krater aşınması değerleri ölçülmüştür. Kesme işleminin sonunda AISI 316 çeliğine kıyasla AISI 304 çeliğinde %18 oranında daha az yan yüzey aşınması ve %67 oranında daha az krater derinliği oluşmuştur. Her iki malzemenin işlenmesinde de kesici takımlarda çentik aşınması gözlenmemiştir.
- AISI 316 çeliği ile elde edilen kesme kuvveti değerleri AISI 304 çeliği ile elde edilen kesme kuvveti değerlerinden daha yüksektir. Bu farkın; 0,15, 0,3 ve 0,45 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla ortalama % 3,3, % 5,7 ve % 5,7 olduğu görülmüştür.
- Her iki malzeme sınıfı için de; ilerleme hızındaki artış ile kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü de artmıştır. 0,15 mm/dev ilerleme hızı % 100 ve % 200 oranında artırıldığında F_c değerleri de sırasıyla ortalama % 63 ve % 132,

yüzey pürüzlülüğü değerleri ise ortalama % 189 ve % 457 oranında artış göstermiştir.

- Kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin artmasında ilerleme hızı kesme hızından daha etkili olmuştur.
- Genel olarak AISI 316 çeliğinin işlenmesinde daha yüksek R_a değerleri elde edilmiştir. Ölçülen R_a değerleri 0,15, 0,3 ve 0,45 mm/dev ilerleme hızlarında sırasıyla ortalama %20, %13 ve %22 oranda daha yüksektir.

Bu çalışmada, sanayide geniş kullanım alanına sahip iki farklı östenitik paslanmaz çelik sınıfı yüzey pürüzlülüğü, esas kesme kuvvetleri ve takım aşınması açısından kıyaslanmıştır. Yan yüzey ve krater aşınmaları açısından bir değerlendirme yapılarak literatüre katkı sağlanmıştır.

5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar olarak, bu çalışmayı 07/2010-23 numaralı proje ile destekleyen Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederiz. Bu makale, Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu'nda (UMAS 2015) daha dar bir kapsamda bildiri olarak sunulmuş ve bildirinin özeti özetler kitabında yer almıştır.

6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Odabaş, C., "Paslanmaz çelikler", Eczacıbaşı, Kaynak Tekniği Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul, (2004).
2. Can, A.Ç., "Malzeme bilgisi", Birsen Yayınevi, İstanbul, (2006).
3. Reiter, A.E., Brunner, B., Ante, M. and Rechberger, J., "Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel", *Surface & Coatings Technology*, 200: 5532–5541, (2006).
4. Maranhão, C. and Paulo Davim, J., "Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: numerical simulation and experimental validation", *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18: 139–156, (2010).
5. Aran, A., Temel, M.A., "Paslanmaz Çeliklerin Üretimi, Kullanımı, Standartları", Sarıtaş Teknik Yayın, İstanbul, (2004).
6. Çakır, M.C., "Modern talaşlı imalatın esasları", Vipaş A.Ş., Bursa, (1999).
7. Ashraf, M., Gardner, L. and Nethercot, D.A., "Compression strength of stainless steel cross-sections", *Journal of Constructional Steel Research*, 62: 105-115, (2006).
8. Ranganathan, S., Senthilvelan, T., Sriram, G., "Mathematical modeling of process parameters on hard turning of AISI 316 SS by WC insert", *Journal of Scientific and Industrial Research (JSIR)*, 68: 592-596, (2009).
9. Selvaraj, P., Chandramohan, P., "Optimization of surface roughness of AISI 304 austenitic stainless steel in dry turning operation using taguchi design method", *Journal of Engineering Science and Technology*, 5: 293-301, (2010).
10. Özek, C., Hasçalık, A., Çaydaş, U., Karaca, F., Ünal, E., "Turning of AISI 304 austenitic stainless steel", *Journal of Engineering and Natural Sciences, Sigma*, 2: 117-121, (2006).
11. Korkut, İ., Kasap, M., Çiftçi, İ., Şeker, U., "Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel", *Materials and Design*, 25(4):303–305, (2004).
12. Çiftçi, İ., "Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesici takım kaplamasının ve kesme hızının kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2): 205-209, (2005).
13. Yeyen, H.E., Korkut, İ., Turgut, Y., Çiftçi, İ., "AISI 303 östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesme hızı ve ilerlemenin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri", *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, (2009).
14. Savaşkan, T., "Malzeme Bilgisi ve Muayenesi", Derya Kitabevi, Trabzon, (2007), ISBN:978-9944-0068-0-4.
15. www.matweb.com.
16. Işık, Y., "Investigating the machinability of tool steels in turning operations", *Materials and Design*, 28: 1417–1424, (2007).
17. Çiçek, A., Kıvak, T., Turgut, Y., Uygur, İ., Ekici, E., "Derin kriyojenik işlemin kesme kuvvetleri, delik çapları ve takım ömrü üzerine etkileri", *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, 33-36, (2011).
18. Işık, Y., Çakır, M.C., "Takım çeliklerinin talaşlı imalatında kesme kuvvetleri ile takım ömrü arasındaki ilişkinin deneysel olarak incelenmesi", *9. Uluslararası Makine Tasarımı ve Üretimi Kongresi*, Ankara, (2000).
19. Kara, F., Aslantaş, K., Çiçek, A., "ANN and multiple regression method based modelling of cutting forces in orthogonal machining of AISI 316L stainless steel", *Neural Computing and Applications*, 26: 237-250, (2015).
20. Uçun, İ., Aslantaş, K., Apaydın, D., "Çok Kaplamalı Kesici takımla tornalama işleminin sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi", *Electronic Journal of Machine Technologies*, 7(1): 69-82, (2010).
21. Kara, F., Aslantaş, K., Çiçek, A., "Prediction of cutting temperature in orthogonal machining of AISI 316L using artificial neural network", *Applied Soft Computing*, 38: 64-74, (2016).
22. Dhar, N.R., Paul, S., Chattopadhyay, A.B., "Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling-tool wear, surface roughness and dimensional deviation", *Journal of Materials Processing Technology*, 123: 483–489, (2002).
23. Aydın, M., Uçar, M., Cengiz, A., "AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliğin Kuru Tornalanabilmesine Kesme Parametrelerinin Etkisi". *2. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir, (2010).
24. Turgut, Y., Yeyen, H.E., Korkut, İ., "AISI 303 Östenitik paslanmaz çeliklerin işlenmesinde kesme hızı ve ilerlemenin talaş biçimine etkisi", *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, (2009).
25. Tekaslan, Ö., Gerger, N., Şeker, U., "AISI 304 Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Kesme Parametrelerine Bağlı Olarak Yüzey Pürüzlülüklerinin Araştırılması". *BAÜ FBE Dergisi*, 10(2): 3-12, (2008).

Alüminyum Tozu Katkılı Polipropilenin Ergiyik Akış İndeksi Özelliklerinin İncelenmesi

Abdulmecit GÜLDAŞ^{1*}, Servet TEMEL², Mehmet ALTUĞ³

¹Gazi Üniversitesi, Ankara 06560, Türkiye

²Özel Enka Anadolu Teknik Lisesi, Dilovası, Kocaeli, Türkiye

³İnönü Üniversitesi, Malatya 44100, Türkiye

(Geliş/Received : 21.02.2016 ; Kabul/Accepted: 25.09.2016)

ÖZ

Gerçekleştirilen bu çalışmada, üç farklı basınç, üç farklı sıcaklık, üç farklı katkı oranı ve üç farklı alüminyum tozu büyüklüğü kullanılarak polipropilen (PP) esaslı kompozit malzeme üretilmiş ve bunların Ergiyik Akış İndeksi (EAI) özellikleri incelenmiştir. Alüminyum (Al) tozlarını ilavesi sırasında PP ile uyum sağlanması için %0,2 oranında maleik anhidrit ve aynı oranda oksitlenmeyi önlemek için fenolik esaslı antioksidan (Songnox-1010) ilave edilmiştir. Çalışmanın deneysel sonuçlarına göre EAI değeri kayma hızı ve kayma gerilmesi, basınç ve sıcaklık artışına bağlı olarak artmış ancak katkı oranı ve Al tozu büyüklüğüne bağlı olarak azalmıştır. Bunun yanında, EAI ile kayma hızı arasında yüksek EAI değerleri elde edilen numunelerde basınç 1379 kPa, sıcaklık 250 °C katkı oranı %10 ve partikül boyutu olarak 44-100 µm olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polimer Kompozitler, Polipropilen, Al Tozu, Ergiyik Akış İndeksi.

Investigation of Melt Flow Index Properties of Polypropylene Reinforced Aluminum Powder

ABSTRACT

In this study, PP-based composite reinforced with three pressures, three temperatures, three reinforcement rates, and three reinforcement sizes were produced and their Melt Flow Index (MFI) properties were investigated. Moreover, 0.2% maleic anhydride and fenolic based antioksidan in order to prevent oxidation were also added during addition of aluminum powders. According to the results of the study, MFI values decrease with increasing viscosity. On the contrary, MFI values increase with increasing shear rate and shear stress. In addition, values of 1379 kPa, 250 C, 5%, 210-300 µm and 44-100 µm were determined as pressure, temperature, reinforcement ratio and particle size respectively for the samples having high MFI values.

Keywords: Polymer Composites, Polypropylene, Al Powder, Reinforcement, Melt Flow Index.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Polimer esaslı kompozitler, plastik sanayisinin en dinamik büyüme gösteren malzemeleri içerisinde özel bir yer tutmaktadır. Bu malzemeler özellikle otomotiv, yapı ürünleri, ambalaj malzemeleri başta olmak üzere diğer uygulamalarda da yoğunlukla tercih edilmektedir. Polimer esaslı kompozit üretiminde çeşitli katkı, dolgu ve takviye elemanları kullanılmaktadır. Plastik malzemelerin özelliklerini geliştirmek için çeşitli katkı ve dolgu maddesi ilavesi sonucu elde edilen kompozit malzemenin birçok özelliği gibi akış özellikleri de değişmektedir. Katkılı plastiklerin şekillendirilmelerinde bu akış özelliğinin bilinmesi üretim için oldukça önemlidir.

Endüstride plastik malzemelerin akış özelliklerinin belirlenmesinde en sık kullanılan yöntem Ergiyik Akış İndeksi (EAI-MFI) testidir [1]. EAI değerinin yanında ayrıca akış analizlerinde kullanılan ve en önemli parametrelerden bir olan viskozite değeri de

hesaplanmaktadır. MFI değeri, akışkanlık hakkında ön bilgi vermekte olup, birincil olarak malzemenin akış oranının düzenliliğinin bir göstergesi olarak kullanılmaktadır [2,3]. Polimerlerin kimyasal yapılarının çok çeşitli olması ve katkı maddelerine bağlı olarak da birçok özelliğinin değişmesi nedeniyle üretim sırasında reolojik özelliklerinin bilinmesi oldukça önemlidir. Özellikle endüstrideki farklı uygulamalar için polimerleri kimyasal yapısı bakımından sınıflandırmak ve polimer çeşitliliğini standartlaştırmak için reolojik özellikler oldukça önem taşımaktadır [4,5].

Kullanım yerlerine göre plastiklerin özelliklerini artırma veya üretim maliyetlerini düşürmek, çevreye en az zarar veren ürün üretebilmek vs gibi nedenlerden dolayı plastik malzemelere çeşitli katkı ve dolgu maddesi eklenerek kompozit malzeme üretilmektedir [1]. Bu bağlamda, ağaç lifi, düşük yoğunluğu, makine parçalarında tahribatsız kullanım, daha az aşındırıcı özelliği, düşük maliyetleri ve en önemlisi biyo-bozunurluk direnci gibi birçok avantajı sağlamaktadır [6-9]. Bu nedenle polimer içerisine çeşitli ağaç tozları katılarak katkı kompozitler üretilmektedir. Ağaç tozu katkı polimerlerin şekillendirilebilmeleri katkısız polimere göre daha farklı olacağından dolayı

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: aguldas@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 51-59

şekillendirmede akışkanlık özelliği büyük önem taşımaktadır.

Ghosh ve Maiti (1997) yapmış oldukları çalışmada % 0-5,6 oranlarında titanyum ile işlem den geçmiş gümüş tozunu polipropilen ile karıştırarak elde edilen kompozit malzemenin kayma hızı, kayma gerilmesi ve viskozitesi kılcal reometre ile incelenmiştir ayrıca aynı malzemenin elastikiyet özellikleri de incelenmiştir [10]. BU çalışmada, ergiyiğin viskozitesi katkı maddesinin % 4,1 oranına kadar azalmış bu değerden sonra artmıştır. Gümüş tozu takviyeli polipropilenin viskozite değeri takviyesiz polipropilenin değerinden daha düşük olduğu belirtilmektedir. Mamunya ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada ise, iletken polimer kompozitler de dolgu maddesi olarak bakır, nikel, demir tozlarının elektrik iletkenliği ve basınç üzerindeki etkisini araştırmışlardır [11]. PP içerisine katılan bakır, nikel, demir tozlarının büyüklüğü ve bu metal tozlarının yüzeyindeki oksit tabakasının kompozitin iletkenliğini etkilediği belirlenmiştir [11]. Rusu ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE)/Çinko toz kompozitlerinin mekanik ve termal özelliklerini incelemişlerdir [12]. Bu çalışmaya göre, HDPE içerisine % 0-20 oranında çinko tozu katılmış olup kompozitin mekanik özellikleri takviyesiz HDPE'ne göre azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde, poli vinil klorür (PVC) içerisine alüminyum tozu takviye edilerek elde edilen kompozitin mekanik ve elektriksel özellikleri Bishay (2011) ve arkadaşları tarafından araştırılmıştır [13]. Chifor ve arkadaşları yaptıkları çalışmada alüminyum ve bakır tozu takviyeli HDPE kompozit malzemenin ısı, mekanik ve elektrik özelliklerini incelemişlerdir [14]. Chifor ve arkadaşları yaptıkları diğer bir çalışmada, bakır tozu takviyeli HDPE kompozit malzemenin ısı, mekanik ve elektrik özelliklerini incelemişlerdir [15]. %30 'a kadar farklı oranlarda takviye edilen ve 100 µm büyüklüğündeki toz partiküller 250 dev/dak hızla dönen metal toz karıştırıcı vasıtasıyla HDPE malzemesi içerisine karıştırılmış ve üretilen kompozitin bir özelliği deneysel olarak incelenmiştir. Benzer şekilde Nurazreena ve arkadaşları da yapmış oldukları çalışmada, alüminyum, bakır ve demir tozlarını HDPE içerisine katarak karışımlarının elektrik direnci ve gerilme dayanımları incelemişlerdir [16].

Tavman, H., yapmış olduğu çalışmalarda %0-%50 oranında alüminyum ve bakır tozlarını sırasıyla % 12 ve % 18 oranında ilave ederek katkılı HDPE esaslı kompozit üretmiş ve bu kompozitlerin termal iletkenlik ve mekanik özelliklerini incelemiştir [17,18]. Bu çalışmalara göre alüminyum tozlarının %12'ye kadar katılmasına bağlı olarak ısı iletkenliğinde önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Ayrıca, alüminyum ve bakır takviye oranına bağlı olarak mekanik özelliklerde azalma olduğu belirlenmiştir. Ayrılmış ve arkadaşları çalışmalarında, polietilen alüminyum kompozitlerinin mekanik özelliklerini araştırmışlardır [19]. Polietilen alüminyum kompozitlere selülozik atıklarda elde edilen takviye malzemesi kullanmış ve bu şekilde mukavemet değerlerini arttırmıştır. Kim ve arkadaşları yaptıkları

çalışmada, epoksi içerisine % 10 oranında alüminyum tozu takviye ederek dökme yöntemi ile kompozit üretmiş ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir [20]. Literatürde yapılan diğer çalışmalara bakıldığında polimer içerisine çinko borat [21], gümüş [22], alüminyum [23], nikel [24] vs gibi birçok metal tozları ve grafit gibi malzemeler [25,26] katıldığı ve bu metal tozlarının takviye oranına bağlı olarak malzemenin elektrik ve ısı iletkenliğini önemli derecede artırdığı görülmektedir. Bunların yanında, alümina (alüminyum oksit), tenorit (bakır oksit) gibi metal oksitler de polimer esaslı kompozitlerin ısı iletkenlik değerlerini artırdığı da belirtilmiştir [27]. Termoplastik içerisine katılan elyaf takviyesi de kompozitin ısı iletkenliğini değiştirmektedir [28].

Karataş ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada 8,15 µm büyüklüğünde ve ağırlıkça %50 oranında sabun taşı tozunu HDPE ve beraberinde bağlayıcı olarak üç farklı balmumunun (parafin, arı balmumu ve carnauba balmumu) reolojik özellikleri nasıl etkilediğini incelemişlerdir [29]. Reolojik inceleme kılcal reometrede gerçekleştirilmiş olup 120-180 °C sıcaklık ve 12,3- 124,7 kPa basınç aralıklarında farklı değerlerde EAİ, viskozite, kayma hızı ve kayma gerilmeleri tespit edilmiştir. Güngör yapmış olduğu çalışmada hacimce % 5, 10 ve 15 oranlarında 50 µm boyutundaki demir tozlarını HDPE içerisine katarak kompozitin mekanik ve reolojik özellikleri belirlenmiştir [30]. Yapılan bu çalışmaya göre üretilen bu kompozitin EAİ değeri demir tozu takviye oranı artışına bağlı olarak artmıştır. Ergime sıcaklığı ise artan takviye oranına bağlı olarak %10 takviye oranına kadar artmış, %15 de ise tekrar düşmüştür.

Gerçekleştirilen bu çalışmada ise, PP içerisine değişik boyut ve oranlarda alüminyum tozları katılarak kompozit malzeme üretilmiştir. PP esaslı kompozit malzeme içerisine 44-100 µm, 101-210 µm, 210-300 µm olmak üzere üç farklı boyut aralığında ve ağırlıkça %5, %10, %15 olmak üzere üç farklı katkı oranında Al tozları eklenmiştir. Üretilen PP esaslı kompozitin reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla ergiyik akış indeksi-EAİ değeri araştırılmıştır. Bunun için, üç farklı basınç (298,2 kPa; 689,5 kPa, ve 1379 kPa) ve üç farklı sıcaklık (210 °C, 230 °C, 250 °C) değeri kullanılmıştır. Reolojik özellikleri tespit etmek için yapılan EAİ testlerinde EAİ değerlerinin yanında viskozite, kayma hızı ve kayma gerilmeleri de belirlenmiştir. Böylece, EAİ değerinin kayma hızı, kayma gerilmesi ve viskozite değişimine bağlı olarak nasıl değiştiği tespit edilmiştir.

2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

2.1. Kompozitin Hazırlanması (Composites Preparation)

Bu çalışmada, polipropilen hammaddesine üç farklı katkı oranı (%5, %10, %15) ve 44-100 µm, 101-200 µm, 210-300 µm olmak üzere üç farklı boyut aralığındaki alüminyum tozları katılarak 3-4 mm büyüklüğündeki katkılı PP granülleri üretilmiştir. Alüminyum tozları standart elekler ile elenerek toz büyüklüğü 44-100 µm,

101-200 μm , 210-300 μm aralığında olması sağlanmıştır. Alüminyum tozlarının PP içerisine üniform olarak katılabilmesi için tane boyutu 850 μm olan toz PP kullanılmıştır. Ayrıca, alüminyum tozlarını ilavesi sırasında Al tozları ile PP malzemesinin uyum sağlaması için % 0,2 oranında maleik anhidrit ve aynı oranda oksitlenmeyi önlemek için fenolik esaslı antioksidan (Songnox-1010) ilave edilmiştir ilave edilmiştir. PP hammaddesi fırında 75 °C de 1 saat kurutularak muhtemel olabilecek nem bünyeden uzaklaştırılmıştır. Alüminyum tozlarının ilk önce kuru olarak PP tozlarına ilave edilmiş ve kuru şartlarda karıştırılmıştır. Al tozu katkılı granüller üretildikten sonra tozlarının üniform dağılabilmesi için granüller ikinci defa ekstruderden geçirilmiştir.

Al tozları ile PP granüllerini karıştırılabilmek için kullanılan ekstruder ünitesi ve kırıcı üniteleri 1,5 kW gücündeki iki farklı motor ile tahrik edilmekte olup elektronik kontrol ünitesi (dijital sürücü) ile kontrol edilmektedir. Vidalı mil çapı 20 mm ve boyu 600 mm olup boy/çap oranı 1/30 dur. Kovan üç farklı ısıtma bölgesinde ısıtılmakta olup her bir ısıtma ünitesi ayrı ayrı dijital olarak kontrol edilmektedir. Katkılı PP'nin üretimi için ekstrüzyonun meme kısmına/başlığına göre 30 mm kalınlığında özel kalıp tasarlanmış olup, kalıpta 4 mm çapında 3 adet silindirik delik bulunmaktadır. Kalıptan geçen malzeme soğutma bölgesinden soğuyarak kırıcı ünitesine gelmektedir. Kırıcı ünitesinin motorundan alınan dönme hareketi kesiciye kayış kasnak sistemi ile

aktarılmakta ve sabit devirle dönmektedir. Kırıcı ünitesi besleme merdaneleri ise dijital sürücü ile kontrol edilmekte olup, 0-50 dev/dak aralığında istenilen devirde ayarlanabilmektedir. Çift kauçuk merdane arasından geçen silindirik olarak çekilmiş plastik profil, kırıcı bıçağı ile istenilen büyüklüklerde kesilerek granül üretilmektedir. Granül üretilirken kullanılan ekstruder parametreleri Çizelge 1'de gösterilmektedir.

2.2. Ergiyik Akış İndeksi Testi (Melt Flow Index Testing)

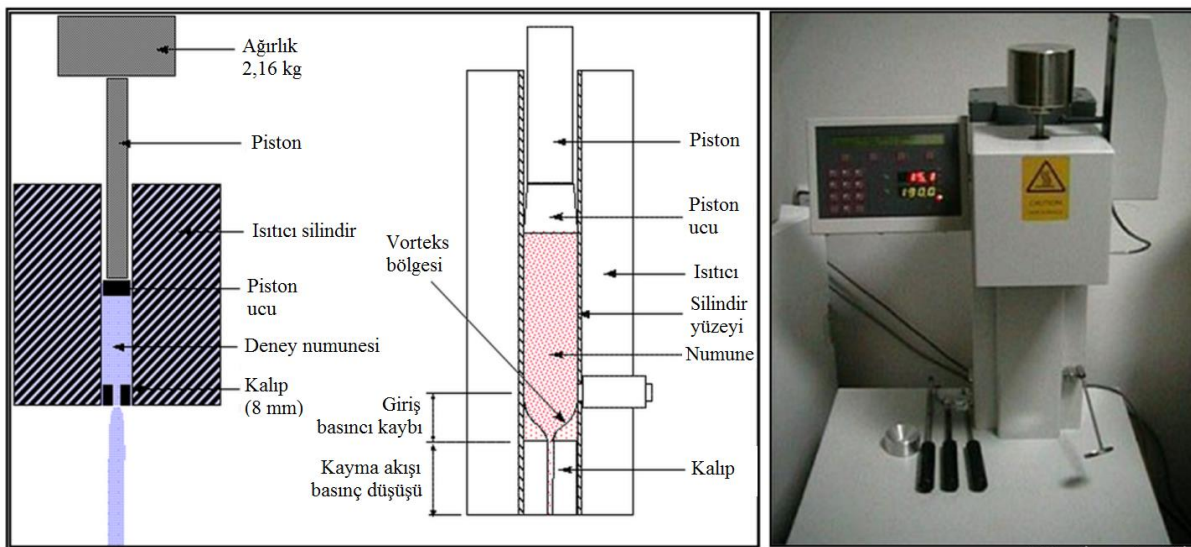
Malzemelerin EAİ değerlerinin tespit edilmesinde kullanılan deney cihazı standart EAİ deney cihazı olup Şekil 1'de görülmektedir. Deney çalışmasında kullanılan EAİ test cihazı, Davenport marka test cihazı olup, bilgisayar kontrollüdür. Cihazın ısıtıcı sistemi 0-400 °C aralığında çalışmakta olup, 0,1 °C hassasiyetindedir. Deneyler ASTM D1238 standardına göre yapılmıştır. EAİ sonuçları $\text{cm}^3/10 \text{ dak}$ ya da $\text{g}/10 \text{ dak}$ cinsinden elde edilmektedir. Yazılım her bir deneyde ün farklı deneyler okuyup aritmetik ortalamayı vermektedir. Her bir test üçer defa tekrarlanmıştır.

2.3. Deney Tasarımı (Experimental Setup)

Reolojik deneyler, üç farklı basınç (298,2 kPa, 689,5 kPa ve 1379 kPa), üç farklı sıcaklık (210 °C, 230 °C, 250 °C) üç farklı katkı oranı (%5, %10, %15) ve üç farklı alüminyum tozu boyutları (44-100 μm , 101-200 μm , 210-300 μm) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. Granül üretimi için ekstrüzyon parametreleri (Extrusion parameters to manufacture of granule)

	Malzeme	I. ısıtma	II. ısıtma	III. ısıtma
Ekstruder ısıtma bölgesi (°C)	Al tozu (first	170	185	190
	Granül (second	200	220	230
Vidalı mil devri,		40		
Kırıcı ünite devri,				



Şekil 1. Ergiyik akış indeksi şeması (Schema of the Melt Flow Index)

Çizelge 2. Ekstruderde üretilen kompozit granüllerin toz boyutu ve katkı oranına göre deney kodları (Experimental code of manufacturing of composite granules using extruder according to powder size and reinforcement rate)

Granül kodu	Katkı oranı Rr (%)	Al toz boyutu Rs (µm)
A1	5	44 - 100
B1	10	
C1	15	
A2	5	100 - 210
B2	10	
C2	15	
A3	5	210 - 300
B3	10	
C3	15	
Katkısız PP	-	-

Ayrıca her bir katkı oranı ve her bir tane boyutuna göre hazırlanan numunelere kodlar verilmiştir (Çizelge 2). Deneyler sırasında her bir deney 3 defa tekrarlanmış ve her bir tekrar arasında standart gereği %15 den fazla fark olmaması sağlanmıştır.

Çalışmada Taguchi L₉ ortogonal deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan parametreler ve seviyeleri Çizelge 3'de verilmiştir. EAİ için en büyük en iyi yöntemi kullanılmıştır (Eş. 1). Deney tasarımı, sonuçlar ve S/N oranları Çizelge 4'de verilmiştir.

En büyük en iyi;

$$S/N_L = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

Çizelge 3. Parametre ve seviyeler (Parameters and levels)

Parameter	Seviye		
	I	II	III
Basınç (kPa)	298,2	689,5	1379
Sıcaklık (°C)	210	230	250
Katkı oranı (%)	5	10	15
Al toz boyutu	44-100	101-200	201-300

Çizelge 4. L₉ ortogonal tasarım ve EAİ sonuçları [9] (L₉ orthogonal design and MFI results)

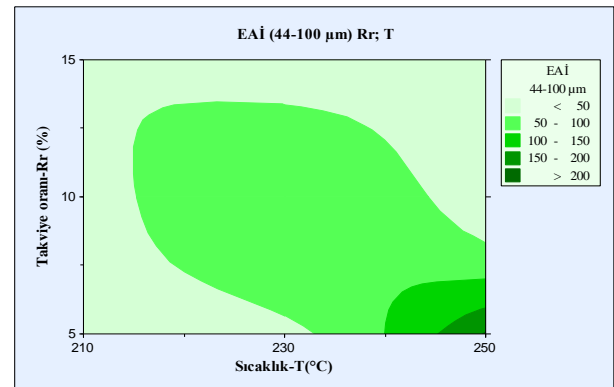
Deney No	T °C	P kPa	Rr %	Rs µm	EAİ cm ³ /10 dk	S/N
1	210	298,2	5	44	4,206	12,4774
2	210	689,5	10	100	16,029	24,0981
3	210	1379	15	210	77,99	37,8408
4	230	298,2	10	210	5,831	15,3149
5	230	689,5	15	44	18,748	25,4591
6	230	1379	5	100	93,472	39,4136
7	250	298,2	15	100	9,085	19,1665
8	250	689,5	5	210	47,368	33,5097
9	250	1379	10	44	147,573	43,3801

3. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Katkılı plastiklerin içerisine eklenen katkı elemanının oranına bağlı olarak akış özelliğinde azalma olmaktadır. Katkılı plastik üretimi sırasında akışkanlığı artırmak ve başarılı bir kalıplama işlemini gerçekleştirebilmek için kayma hızı artırılması yani akış özelliğinin iyileştirilmesi gerekmektedir. Akışkanlığı artırmak için sıcaklık veya basınç artırılmaktadır. Kompozit granüllerin enjeksiyonla kalıplama işlemleri sırasında granülün ergime sıcaklığı ve kalıp içerisindeki akışkanlığı, kalıbın dolması ve eksik baskı olmaması için oldukça önem taşımaktadır. Enjeksiyon sıcaklığının tek başına kalıp boşluğunun doldurulması için yeterli olmayabilir. Bu durumda kalıbın hatasız dolması için sıcaklığın yanında uygun enjeksiyon basınçlarına da ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada Al partikülleri katılmış PP malzemelerin EAİ değerleri incelenmiş ve elde edilen değerler sıcaklık, basınç, katkı oranı ve partikül boyutuna göre analiz edilmiştir.

Enjeksiyonla kalıplama işleminde kullanılan enjeksiyon sıcaklığı PP moleküllerinin bağ yapısını zayıflatarak kalıp içerisine rahatça akmasını kolaylaştırmaktadır. Düşük sıcaklıklarda ise malzemenin moleküller arasındaki bağ yapısı gevşeyip ergiyik hale gelmediği için plastik malzeme akamaz. Ancak, plastik malzemenin akışkanlığını artırmak için sıcaklık gereğinden fazla artırıldığında ise molekül zincirleri deforme olur yani malzemenin kimyasal yapısı bozulur. Bundan dolayı kalıplama esnasında ideal sıcaklık değerlerinin kullanılması gerekmektedir.

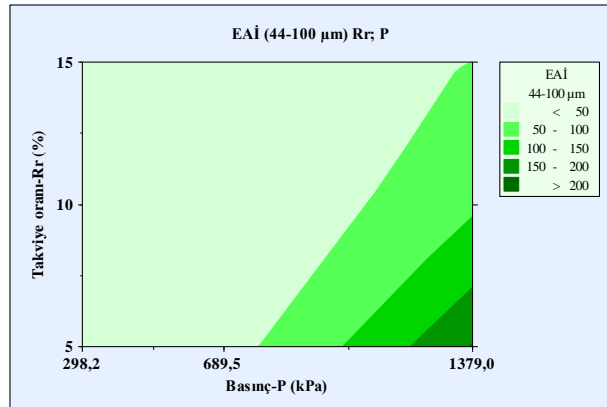
Şekil 2'de 44-100 µm büyüklüğünde Al partiküllerinin eklendiği numunelerde sıcaklık ile Al tozu katkı oranı ilişkisi incelenmiştir. Şekil 2'ye göre katkı oranına bağlı olarak en iyi EAİ değeri %10 katkı oranında elde edilmiştir. Ayrıca literatürdeki çalışmalara [28] paralel olarak sıcaklık değerlerindeki artış ile EAİ değerlerinde de artış gözlenmiştir.



Şekil 2. 44-100 µm partikül boyutunda sıcaklık katkı oranı grafiği (Temperature reinforcement ratio chart on 44-100 µm partikül size)

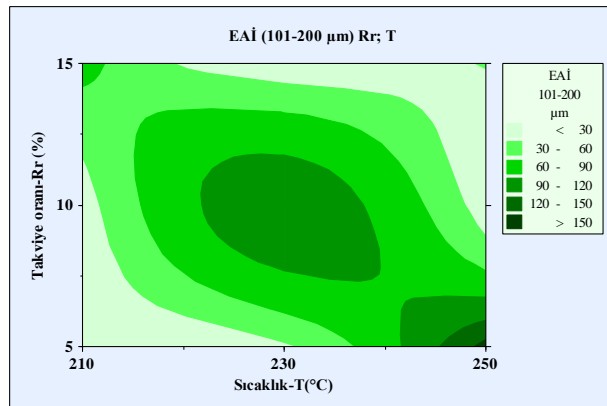
Şekil 3'de 44-100 µm büyüklüğünde Al partiküllerinin eklendiği numunelerde basınç-katkı oranı ilişkisi incelenmiştir. Şekil 3'e göre yüksek EAİ değerleri %5

katkı oranında elde edilmiştir. Katkı oranının artışı ile EAİ değerleri doğrusal olarak azalmaktadır. Ayrıca basınç değerlerindeki artış ile EAİ değerlerinde de artış gözlenmiştir.



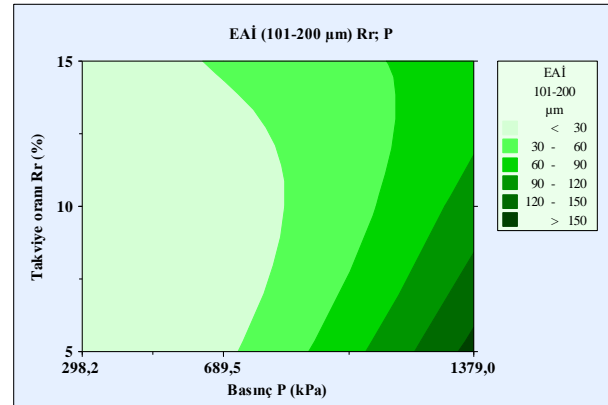
Şekil 3. 44-100 µm Partikül boyutunda basınç-katkı oranı grafiği (Pressure reinforcement ratio chart on 44-100 µm partikül size)

Şekil 4'de 101-200 µm büyüklüğünde Al partiküllerinin katıldığı numunelerde sıcaklık-katkı oranı ilişkisi incelenmiştir. Şekil 4'e göre yüksek EAİ değerleri 250 °C sıcaklık değerinde ve %5 katkı oranında elde edilmiştir. Ancak katkı oranı %10 olduğunda en yüksek EAİ değerlerini 230 °C elde edilmiştir.



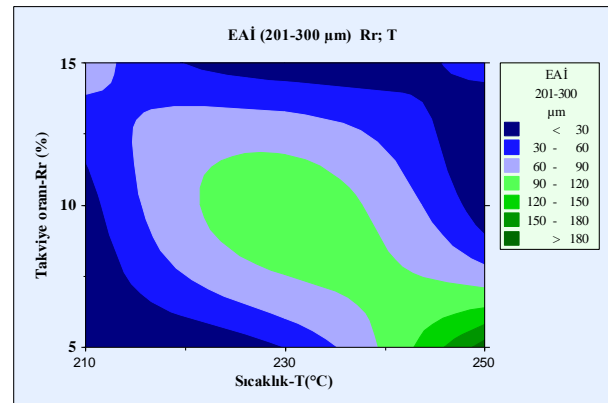
Şekil 4. 101-200 µm Partikül boyutunda sıcaklık-katkı oranı grafiği (Temperature reinforcement ratio chart on 101-200 µm partikül size)

Şekil 5'de 101-200 µm büyüklüğünde Al partiküllerinin katıldığı numunelerde basınç-katkı oranı ilişkisi incelenmiştir. Şekil 5'e göre %5 katkı oranında elde edilmiş yüksek EAİ değerleri verilmiş olup, katkı oranı arttıkça EAİ değerlerinde önemsiz miktarda bir artış olduğu gözlenmiştir. Ayrıca literatürdeki çalışmalara paralel olarak basınç değerlerindeki artış ile EAİ değerlerinde de artış gözlenmiştir.



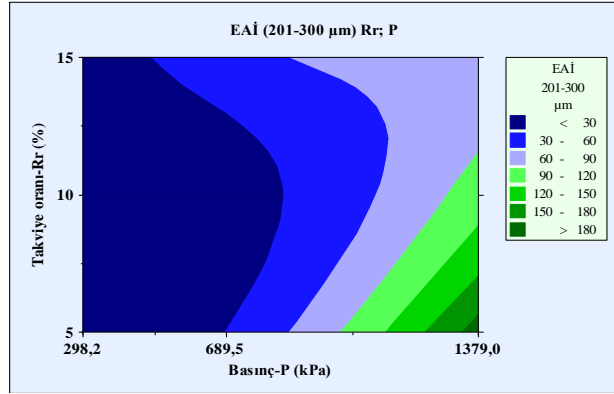
Şekil 5. 101-200 µm Partikül boyutunda basınç-katkı oranı grafiği (Pressure reinforcement ratio chart on 101-200 µm partikül size)

Şekil 6'de 210-300 µm büyüklüğünde Al partiküllerinin eklendiği numunelerde sıcaklık-katkı oranı ilişkisi incelenmiştir. Şekil 6'ya göre yüksek EAİ değerleri %5 katkı oranında elde edilmiştir. Ayrıca %5 ve %15 katkı oranlarında sıcaklık değişimleri EAİ değerleri üzerinde belirgin bir artış sağlayamamıştır.



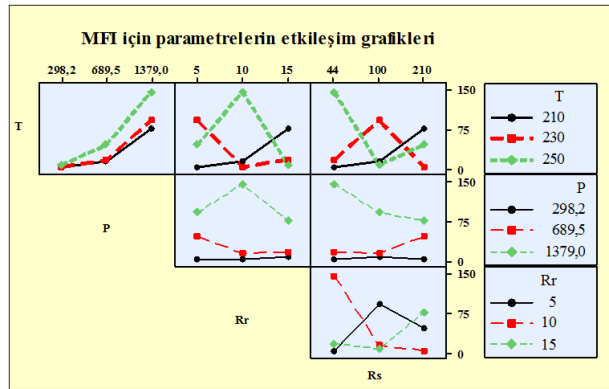
Şekil 6. 210-300 µm Partikül boyutunda sıcaklık-katkı oranı grafiği (Temperature reinforcement ratio chart on 210-300 µm partikül size)

Şekil 7'de 210-200 µm büyüklüğünde Al partiküllerinin eklendiği numunelerde basınç-katkı oranı ilişkisi incelenmiştir. Şekil 7'ye göre yüksek EAİ değerleri %5 katkı oranında ve 250 °C'de elde edilmiştir. Burada, 298,2 kPa basıçta tüm katkı oranlarında EAİ değerleri oldukça düşük çıkmıştır. EAİ değerlerinin artışı 689,5 kPa basınçtan sonra artış göstermiştir.

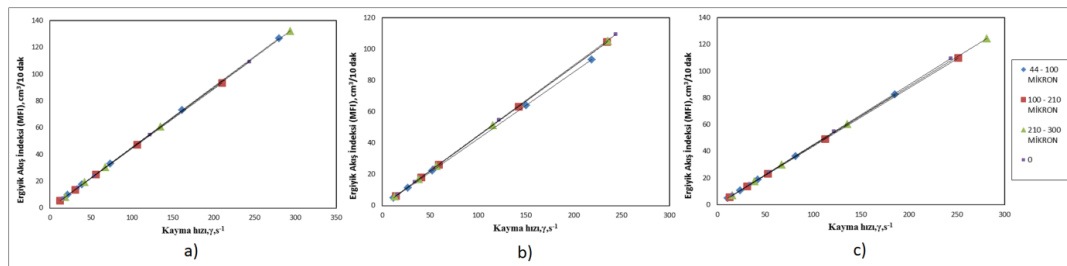


Şekil 7. 210-300 µm Partikül boyutunda basınç-katkı oranı grafiği (Pressure reinforcement ratio chart on 210-300 µm partikül size)

Şekil 8'e göre EAİ değerleri elde edilirken parametrelerin birbirleriyle etkileşim grafikleri verilmiştir. Burada sıcaklık ve basınç değerlerine göre 250 °C ve 1379 kPa'da EAİ değeri 147,573 cm³/ 10 dk gibi en yüksek değerine ulaşmıştır. Ancak partikül boyutunun (Rs) diğer parametrelerle etkileşimi incelendiğinde farklı sonuçlar elde edilmektedir. Partikül boyutuna göre en yüksek değerleri 250 °C'de 44-100 µm da elde edilirken, sıcaklık 230 °C olduğunda en yüksek EAİ değeri 101-200 µm elde ediliyor. Ayrıca katkı oranının %10 olduğu durumda en iyi EAİ değeri 44-100 µm da elde edilirken, katkı oranının %5 olduğu durumda en iyi EAİ değeri 101-200 µm'da elde edilmiştir. Genel bağlamda kompozit içerisindeki Al katkı miktarı arttıkça EAİ değerleri azalmaktadır. Bu sonuçlar benzer çalışmalarda da [2] elde edilmiştir.



Şekil 8. Parametrelerin EAİ üzerindeki etkileşim grafikleri (Interaction graphs parameters for MFI)



Şekil 9. 230 °C sabit sıcaklıkta EAİ-kayma hızı ilişkisi. a) % 5 Al/PP granül b) %10 Al/PP granül c) % 15 Al/PP granül. (MFI-Shear rate relationship at 230 °C constant temperature. a) % 5 Al/PP granüle, b) %10 Al/PP granüle, c) % 15 Al/PP granüle)

3.1. EAİ – Kayma Hızı İlişkisi (MFI-Shear rate relationship)

EAİ cihazında elde edilen kayma hızı Eşitlik 2'de verilen denklemden bulunmaktadır.

$$\dot{\gamma}_g = \frac{4Q}{\pi R^3} \quad (1/s) \quad (2)$$

Burada $\dot{\gamma}_g$; görünür kayma hızını, Q ; debiyi ve R ise silindir yarıçapını temsil etmektedir. EAİ test cihazından elde edilen kayma hızı ve viskozite değerleri görünür kayma hızı ve görünür viskozite değerleridir. Kayma hızı, Eşitlik 3'de verilen Rabinowitsch eşitliği ile düzeltilmiştir. Kayma hızı ile kayma gerilmesi grafiğinde, secant doğrusu görünür viskoziteyi vermektedir. Kayma hızına karşı kayma geriliminin herhangi bir noktasında hesaplanacak viskozite ise bağlı viskozite olarak adlandırılır. Bağlı viskozite her zaman için görünür viskoziteden küçüktür. Bu nedenle EAİ cihazından elde edilen kayma hızı ve viskozite düzeltilerek kullanılmaktadır. Bu çalışmada da, düzeltilmiş kayma hızı kullanılarak görünür viskozite de Eşitlik 3 kullanılarak yeniden hesaplanmıştır.

$$\dot{\gamma} = \frac{\gamma_g}{4} \left(3 + \frac{d \log \gamma_g}{d \log \tau} \right) \quad (1/s) \quad (3)$$

Burada, $\dot{\gamma}_g$; görünür kayma hızını, τ ise silindir yüzeylerindeki kayma gerilmesini temsil etmektedir. Elde edilen düzeltilmiş kayma hızı kullanılarak viskozite değerleri de düzeltilmiştir

Şekil 9'daki grafiklerde görüldüğü gibi 230 °C sabit sıcaklıkta basıncın artmasıyla kayma hızı da artmaktadır. Kayma hızı arttığında ise doğal olarak ergiyiğin birim zamanda kesitten geçen akışkan miktarı (EAİ) artmaktadır. Dolayısıyla EAİ-kayma hızı arasındaki ilişki doğrusal olarak gerçekleşmiştir. Kayma hızının artması ile makromolekül zincir yapısına sahip olan ergimiş plastiklerin molekül zincirleri akış doğrultusunda yönlendirilmiştir. Uzun molekül zincirlerinin akış doğrultusunda yönlendirilmeleri ile akışkan tabakaları arasındaki sürtünme azalacak ve zincir yapısı akmaya karşı bariyer görevi görmeyecektir. Böylece, kayma hızının artması zincirlerin akış doğrultusunda yönlendirilmelerine yardımcı olduğu için kayma hızının artmasına bağlı olarak akmaya karşı gösterilen iç dirençte azalmaktadır. Kayma hızı da sıcaklık, basınç ve malzeme özelliklerine bağlı olarak değişim göstermektedir.

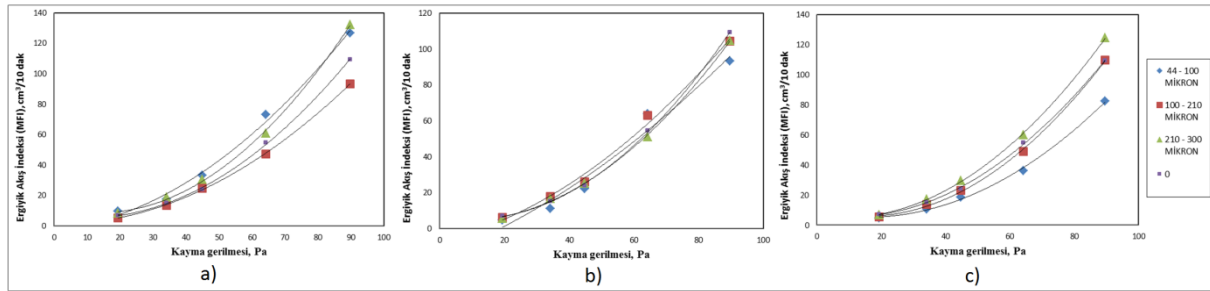
3.2. EAİ – Kayma Gerilmesi İlişkisi (MFI-Shear stress relationship)

EAİ cihazında elde edilen kayma gerilmesi (Eş. 4) reometrenin silindir yüzeylerinde oluşan gerilmeler olup, uygulanan kuvvet, silindir çapı ve silindir boyuna bağlı olarak elde hesaplanan bir parametredir. Ayrıca, pistonun yer değiştirmesi ve silindir çapına bağlı olarak elde edilen kayma hızına bağlı olarak bulunabilmektedir.

$$\tau_R = \frac{\Delta PR}{2L} \quad (\text{kPa}) \quad (4)$$

Burada, τ_R ; silindir yüzeyindeki gerilmeyi, P; pistonu uygulanan basıncı, L; piston boyunu, Q; debiyi, R; silindir yarıçapını temsil etmektedir.

Sıcaklığın molekül zincirlerini deforme etmesinin yanında sıcaklığın artırılması ayrıca maliyetleri de artırmaktadır. Benzer şekilde basınç da EAİ değerini artırmaktadır. Basıncın artması kayma hızını ve kayma gerilmesinin de artmasını beraberinde getirmektedir. Basıncın artması ile katkılı PP'nin üretilebilirliği kolaylaşmakta ancak bu da maliyetleri artırmakta ayrıca üretilen ürün üzerinde özdeş basınç dağılımı olmadığı zamanlarda üründe çarpımalara sebep olmaktadır. Ayrıca basıncın gereğinde çok artırılması ürünün ağırlığını da artıracığı için maliyetler etkilenenektir. Bu bağlamda, Al tozu katkı oranı ve toz büyüklüğü, basınç, sıcaklık parametrelerinin optimum değerlerinin



Şekil 10. 230 °C sabit sıcaklıkta EAİ-kayma gerilmesi ilişkisi. a) % 5 Al/PP granül b) %10 Al/PP granül c) % 15 Al/PP granül. (MFI-Shear stress relationship at 230 °C constant temperature. a) % 5 Al/PP granüle, b) %10 Al/PP granüle, c) % 15 Al/PP granule)

Şekil 10'daki grafiklerde görüldüğü gibi 230 °C sabit sıcaklıkta basınç artışına bağlı olarak EAİ ile kayma gerilmesi arasındaki ilişkinin fonksiyonel olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca en yüksek kayma gerilmesinde, EAİ değerinin 44-100 mikron ve %5 Al tozu katkı oranında olduğu görülmektedir. Ayrıca en düşük kayma gerilmesinin ise 44-100 mikron ve %15 Al tozu katkı oranında olduğu görülmektedir.

Alüminyum tozu katkılı PP granüllerinin üretimi ve EAİ özelliğinin incelendiği bu çalışmaya göre, Al tozu katkı oranı ve Al toz büyüklüğü arttıkça EAİ değerinde azalma olmaktadır. EAİ değerinin azalması ergiyik katkılı PP'nin akışkanlığının azalması demektir. Endüstride PP'nin kullanım alanını artırmak veya iyileştirmek amacıyla katılan katkı maddelerinde olan metal tozları özellikle Al tozu PP'nin ısı ve elektrik iletkenliğini artırdığı literatürden bilinmektedir. Bu çalışmada, PP'nin özelliğini geliştirmek için katılan Al tozlarının boyutu ve katkı oranının artmasının akışkanlığı azaltması katkılı PP'nin üretilebilirliğini / kalıplanabilirliğini azaltmaktadır. Bu iki parametrenin yanında basınç, sıcaklık ve kayma hızının artması ise EAİ değerini artırdığı tespit edilmiştir. Al tozu büyüklüğü ve katkı oranının artması ile düşen EAİ değeri sıcaklık ve basıncı artırılması ile tekrar artırılabilir. Ancak polimerlerin molekül yapılarının yüksek sıcaklık ile deforme olmaları bilindiğinde dolayı üretim sırasında sıcaklığın yükseltilmesi üretilebilirliği kolaylaştırırken plastiğin özelliğini kaybetmesine sebep olduğu için mecbur kalınmadıkça plastik üreticisi firmanın önerdiği sıcaklık değerinin üzerine çıkmaması oldukça önemlidir.

belirlenerek üretimin gerçekleştirilmesi hem ürün kalitesi hem de maliyetler açısından önemlidir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, PP hammaddesine üç farklı katkı oranı (%5, %10, %15) ve üç farklı alüminyum partikül büyüklüğü (44-100 µm, 101-200 µm, 210-300 µm) katılarak katkılı polipropilen üretilmiştir. Reolojik deneyler, beş farklı basınç (298,2 kPa, 689,5 kPa ve 1379 kPa), beş farklı sıcaklıkta (210 °C, 230 °C, 250 °C) gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmaya göre;

- EAİ değeri sıcaklık ve basınç artışına bağlı olarak artmış, yüksek EAİ değerleri elde edilen numunelerde basınç 1379 kPa, sıcaklık 250 °C katkı oranı %10 ve partikül boyutu olarak 44-100 µm olarak tespit edilmiştir.
- Kayma hızı arttıkça EAİ doğrusal olarak artmaktadır.
- Kayma gerilmesi arttıkça EAİ değeri parabolik olarak artmaktadır.
- EAİ ve kayma gerilmesi fonksiyonel bir ilişki gerçekleşmiştir. En yüksek kayma gerilmesinde EAİ değerinin 44-100 mikron ve %5 Al tozu katkı oranında en yüksek olduğu görülmektedir. En düşük kayma gerilmesinin ise 44-100 mikron ve %15 Al tozu katkı oranında olduğu görülmektedir.

SEMBOLLER (NOTATIONS)

L	Piston boyu, m
P	Basınç (kPa)
R	Silindir yarıçapı, m
R _r	Katkı oranı (%)
R _s	Al toz boyutu (µm)
T	Sıcaklık (°C)
τ	Kayma gerilmesi, N/m ²
τ _R	Silindir yüzeyindeki gerilme, N/m ²
γ _g	Görünür kayma hızı, 1/s
Q	Debi, m ³ /s

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma, 07/2009-17 numarası ile Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Güldaş, A., Temel, S. "Alüminyum Tozu Takviyeli Polipropilenin Takviye Oranına Göre Mekanik Özellikleri", *1st International Symposium on Plastic and Rubber Technologies and Exhibition*, Ankara, (2013).
- Kim, Y.S., Chung, C.I., Lai, S.Y., Hyun, K.S., "Melt rheological and thermodynamic properties of polyethylene homopolymers and poly(ethylene/α-olefin) copolymers with respect to molecular composition and structure" *J. Appl. Polym. Sci.*, 59: 125 (1996).
- Zuidema, H., Peters, G.W.M., Meijer, H.E.H., "Influence of cooling rate on PVT-data of semicrystalline polymers" *J. Appl. Polym. Sci.*, 82: 1170 (2001).
- Spinace, M.A.S., Feroseli, K.K.G., De Paoli, M.A., "Recycled polypropylene reinforced with curaua fibers by extrusion" *J. Appl. Polym. Sci.*, 112: 3686 (2009).
- Lai, S.M., Yeh, F.C., Wang, Y., Chan, H.C., Shen, H.F., "Comparative study of maleated polyolefins as compatibilizers for polyethylene/wood flour composites" *J. Appl. Polym. Sci.*, 87: 487 (2003).
- Sobczak, L., Lang, R.W., Haider, A., "Polypropylene composites with natural fibers and wood—General mechanical property profiles". *Composites Science and Technology*, 72: 550 (2012).
- Ichazo, M.N., Albano, C., Gonzalez, J., Perera, R., Candal, M.V., "Polypropylene/wood flour composites: treatments and properties" *Comp. Structures*, 54: 207 (2001).
- Harper, D., Wolcott, M., "Interaction between coupling agent and lubricants in wood–polypropylene composites" *Composites: Part A*, 35: 385 (2004).
- Temel, S., "The Determination Of Rheological And Mechanical Properties Of Aluminum Powder Reinforced Polypropylene", *Ms.C. Thesis, Gazi University, Graduate School of Natural And Applied Sciences*, Ankara, (2014).
- Ghosh, K., Maiti, S.N., "Melt Rheological Properties of Silver-Powder-Filled Polypropylene Composites", *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 36 (5): 703-722, (1997).
- Mamunya, Y.P., Zois, H., Apekis, L., Lebedev, E.V., "Influence of pressure on the electrical conductivity of metal powders used as fillers in polymer composites", *Powder Technology*, 140: 49-55 (2004).
- Rusu M., Sofian N., Rusu D., Mechanical and thermal properties of zinc powder filled high density polyethylene composites, *Polymer Testing*, 20: 409-417, (2001).
- Bishay, I.K., Abd-El-Messieh, S.L., Mansour, S.H., "Electrical, Mechanical and Thermal Properties of Polyvinyl Chloride Composites Filled with Aluminum Powder", *Material and Design*, 32: 62–68, (2011).
- Chifor, V., Tekiner, Z., Türker, M., Orban, R., "An Experimental Investigation of Properties of polyethylene Reinforced with Al Powders", *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A -Applied Physics Engineering*, 1-5, (2010).
- Chifor, V., Orban, R., Tekiner, Z., Turker, M., "Thermal mechanical, and electrical properties of high density polyethylene composites reinforced with copper powder", *Materials Science Forum*, 672: 191-194, (2011).
- Nurazreena, L. Hussain, B., Ismail, H., Mariatti, M., Metal Filled High Density Polyethylene Composites – Electrical and Tensile Properties, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19: 413-425, (2006).
- Tavman, I. H., "Thermal and Mechanical Properties of Aluminum Powder-Filled High-Density Polyethylene Composites", *Journal of Applied Polymer Science*, 62: 2161-2167, (1996).
- Tavman, I. H., "Thermal and mechanical properties of copper powder filled poly (ethylene) composites", *Powder Technology*, 91: 63-67, (1997).
- Ayrılmış, N., Kaymakçı, A., Akbulut, T., Elmas, G.M., Mechanical performance of composites based on wastes of polyethylene aluminum and ligno cellulose, *Composites: Part B*, 47: 150-154, (2013).
- Kim, H.J., Jung, D.H., Jung, I.H., Cifuentes, J.I., Rhee, K.Y., Hui, D., "Enhancement of mechanical properties of aluminium/epoxy composites with silane functionalization of aluminium powder", *Composites: Part B*, 43: 1743–1748, (2012).
- Güldaş, A., Çankaya, A., Güllü, A., Gürü, M., "Çinko borat katkılı polipropilenin reolojik özelliklerinin belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29:2, 227-234, (2014).
- Rybak, A., Boiteux, G., Melis, F., Seytre, G., "Conductive Polymer Composites Based on Metallic Nanofiller as Smart Materials for Current Limiting Devices", *Composites Science and Technology*, 70: 410–416, (2010).
- Carson, J.K., "Measurement and modelling of the thermal conductivity of dispersed aluminium composites", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 38: 1024–1028, (2011).
- Lebedev, S.M., Gefle, O.S., Tkachenko, S.N., "Metal-Polymer Pvd/Nickel Composites and Evaluation of Their Dielectric and Thermal Properties", *Journal of Electrostatics*, 68: 122–127, (2010).
- Azeem, S., Abdein, M.Z., "Investigation of thermal conductivity enhancement in bakelite–graphite particulate filled polymeric composite", *International Journal of Engineering Science*, 52: 30–40, (2012).

26. Wang, S., Qiu, J., “Enhancing thermal conductivity of glass fiber/polymer composites through carbon nanotubes incorporation”, *Composites: Part B*, 41: 533–536, (2010).
27. Moreira, D.C., Sphaier, L.A., Reis, J.M.L., Nunes, L.C.S., “Experimental Investigation of Heat Conduction in Polyester–Al₂O₃ and Polyester–CuO Nanocomposites”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35: 1458–1462, (2011).
28. Bigg, D., “Thermal conductivity of heterophase polymer compositions”, *Advances in Polymer Science*, 119: 1–30, (1995).
29. Karatas, C., Kocer, A., Ünal, H. I., Saritas, S., “Rheological properties of feedstocks prepared with steatite powder polyethylene based thermoplastic binders”, *Journal of Materials Processing Technology*, 152 (1): 77-83, (2004).
30. Güngör, A., The Physical and Mechanical Properties of Polymer Composites Filled with Fe Powder, *Journal of Applied Polymer Science*, 99: 2438-2442, (2005).

A Web-Based Educational Tool For Simulation of Reactive Power Compensation With Synchronous Motor

Ramazan BAYINDIR^{1*}, Seyfettin VADI²

¹Gazi University, Faculty of Technology, Department of Electrical & Electronic Engineering, TURKEY

²Gazi University, Gazi Vocational School, Department of Electricity and Energy, TURKEY

(Received : 22.02.2016 ; Accepted : 26.02.2016)

ABSTRACT

In this study, reactive power demand of the load or the load groups has been provided with a synchronous motor through a web interface as user controlled. For the realization of reactive power compensation and monitoring the system via Internet, a data acquisition card (DAQ) has been used which has superior properties compared to other controllers such as PLC and PIC. In this study, adding inductive and resistive load to the network, three-phase voltage and three-phase current values are taken from the network and the power factor value of the system can be monitored via a visual web interface. Active, reactive and apparent power value can be observed in real time via the interface. A new approach for computer-controlled and monitored reactive power compensation systems through the internet that is uncommon in the literature is presented with this experimental system.

Key Words : Synchronous Motor, Reactive Power Compensation, Data Acquisition Card.

1. INTRODUCTION

In recent years, the developments in the field of education have focused around distance learning in parallel with the technological developments. Place limitations of educational institutions, population explosion, and increasing need of the society to have education without attending any educational institution constitute only a few of the reasons why the concept of distance learning has developed. Not only educational institutions but also companies prefer distance learning in personnel education for economic reasons and to prevent time loss. In the institutions providing technical and engineering education, laboratory studies support theoretical studies of students as well as development of practical skills by them. When the laboratory infrastructure and the number of experimental equipment are compared to the number of students, generally significant problems arise in application. Today, education system is going through a re-shaping process. Combination of educational technologies and internet has enabled rapid development of web-based educational systems in addition to face-to-face education model [1-5].

In the past, one-type traditional education model was applied due to lack of technological infrastructure. Some literature studies on the use of modern technologies in this scope are summarized below:

With the development of semiconductor technology, compensation processes are performed using switching elements which have relatively higher speed than the classical systems. Gelen et al. researched and compared in both simulation and experimental environment the voltage, current and power flow of the energy

transmission systems in static and dynamic load by using two FACTS elements of Thyristor-Controlled Reactor (TCR) and Static VAR Compensator (SVC). Compensation process was compared using PI controller in the simulation environment and fuzzy logic control method was found to work in a more efficient and stable manner [6].

In the study realized by Cötelı et al., MATLAB-SIMULINK Toolbox was used to consist a computer-based simulation of STATCOM (Static Synchronous Compensator), a converter-based FACTS device, to control power flow of a transmission line. Results of the simulation program showed STATCOM to be capable of responding to even unexpected sudden changes in a very rapid manner [7]. Dynamic compensation with synchronous motor is also one of the reactive power compensation types. A more stable operation can be achieved via control of the excitation current by different control algorithms. By using object-based software which can produce Artificial Neural Networks (ANN) model which can run under the control of Reactive Power Compensator (RPC) with synchronous motor, Sesveren developed a simulator to simulate RPC operation which uses ANN structure produced by the software. ANN model, which can be used under the control of RPC with synchronous motor, was prepared and showed how to control a synchronous compensator. Moreover, as well as supporting student education via modern technologies by using the developed software showing applicability of artificial intelligence to different fields, it aimed to introduce a new approach to be adopted in technical and engineering education [8]. The process of compensating reactive power, needed by load or load groups, by using specific techniques is called reactive power compensation. These techniques have both advantages and disadvantages compared to each other. Selection of

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: bayindir@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 61-69

the most appropriate technique enables stable system operation and increases system efficiency. In his thesis study, Bilki examined compensation techniques and realized PLC-controlled reactive power application in a facility [9]. Using capacitor groups, Bilki [9] has performed a computer-controlled reactive power compensation experimental set application. PLC was used in the monitoring and controlling of the system by computer. Use of PLC in the reactive power control in the scope of the study enabled monitoring of such important circuit parameters as voltage, current, active power and power factor. The user can follow these values from the computer interface and take on load to the system [10]. Since the system runs as computer-controlled, the user is limited to the space. In their study, Bayındır and Gorgun performed a compensator application using a synchronous motor. A PIC18F452 micro controller was used to perform PI control of the synchronous motor and the motor was run in inductive, capacitive and ohmic modes at different excitation currents. The user could view from the LCD display the instantaneous system values of current, voltage, frequency and power factors [11].

Energy crises the world has faced in recent years has directed researchers to new energy resources on one hand and has focused the studies on designing of more efficient systems and utilization of existing energy resources in the most efficient and highest-quality way on the other hand. One of the most effective measures to improve efficiency and ensure energy saving is “Reactive Power Compensation”. Different methods are used in reactive power compensation. In these methods, the reactive powers required by loads are compensated either statically by capacitors and reactors through different switching element) or dynamically by synchronous motors [12-14].

In the method where a synchronous motor is used for compensation, excitation current is changed to enable drawn of active and reactive power from the network. In the present study, the user connects to the system through the internet using the web interface and creates inductive effect on the system by including inductive load or load groups to the network the system is connected to. Since this is an unsolicited status, the system enables approximation of power factor to 1 by automatically applying capacitive load to the system via synchronous motor.

2. USE OF SYNCHRONOUS MOTOR AS A COMPENSATOR

In grids, the loads are generally inductive. Because the induction motors, transformers, ballast bulbs, etc. connected to the network are all inductive loads. Since inductive loads are decreased actual power capacities of alternators, they result in drastic voltage drops in transmission lines, in turn, efficiency loss. Moreover, as reactive energies drawn by the inductive loads used in industry overload energy transmission lines, it becomes

necessary to increase the conductor size of the energy transmission line in order to increase the amount of active energy drawn from the line. Reactive energies the loads require can be compensated either by capacitors statically or by synchronous motors dynamically.

Change in the excitation currents of synchronous motors enables capacitive and inductive running mode of the motor. Moreover, the amount of the reactive power drawn by the synchronous motor from the network can be adjusted by excitation current. Thanks to such positive features, synchronous motors are used as dynamic power compensators.

Vector diagrams of the synchronous motor connected to energy transmission line and the load are presented in Fig. 1. If the active power of the system is P_{total} , then it is equal to the sum of P_1 and P_2 , which are, respectively, the active power of the synchronous motor and active power of the load. When the power of the synchronous motor is sufficient, it is possible to zero the system's reactive power by increasing excitation current [17].

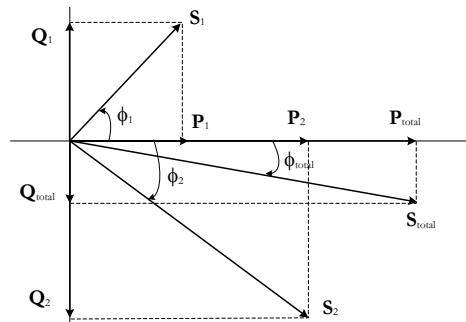


Fig. 1. Vector diagrams of the synchronous motor connected to energy transmission line and the load

Changing of excitation current characteristic of the synchronous motor at stable source voltage and frequency is explained by the V-curves presented in Fig. 2. These curves are obtained from the phasor diagram of the synchronous machine. In unloaded condition, the excitation current I_f is adjusted to run the machine at unit power factor ($\cos=1.0$). In this case, stator current I_s is at minimum. Input power factor of the synchronous machine can be adjusted lagging/leading by decreasing/increasing excitation current. Change in the I_s current (referring to the excitation current) is recorded in the form of V-curves. Synchronous motor V-curves at full and half loads are shown in Figure 2-2 [17].

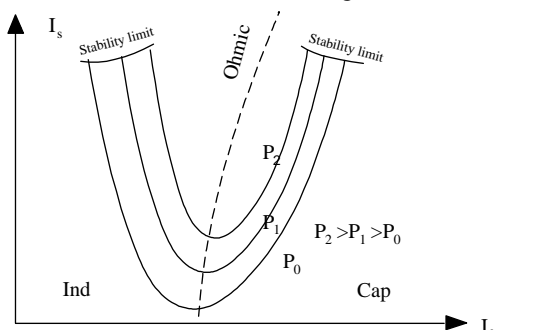


Fig.2. Synchronous motor V-curves

3. SYSTEM ARCHITECTURE

The developed system has an integrated structure composed of a combination of different software and hardware units. Although each hardware and software unit has different tasks, all hardware operates in harmony.

3.1. Hardware Infrastructure

Fig. 3 shows the block diagram of the system composed of current and voltage measurement card, PIC, data acquisition card, zero-crossing circuit, DC source, IGBT circuit, loads and synchronous motor. In this study, a synchronous motor at 4kW power was used for reactive power compensation. Capacitive effect of the synchronous motor enables stabilizing the system's power factor at 0.98

Display on the user web interface of the operating voltage of the load or loads connected to the system and of the current values they draw from the network requires sensing of the voltage and current values. Since the

analogue voltage measurement level of the data acquisition card is maximum +5.0 V, the amplitude of the resulting alternating voltages needs to be reduced. Fig.4 presents the application circuit designed to reduce the amplitude of the current and voltage values.

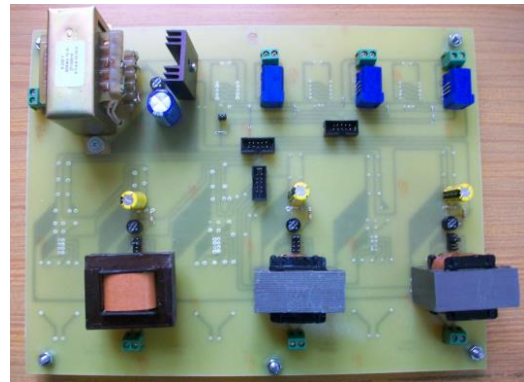


Fig.4. Current - voltage sensing and transformation circuit

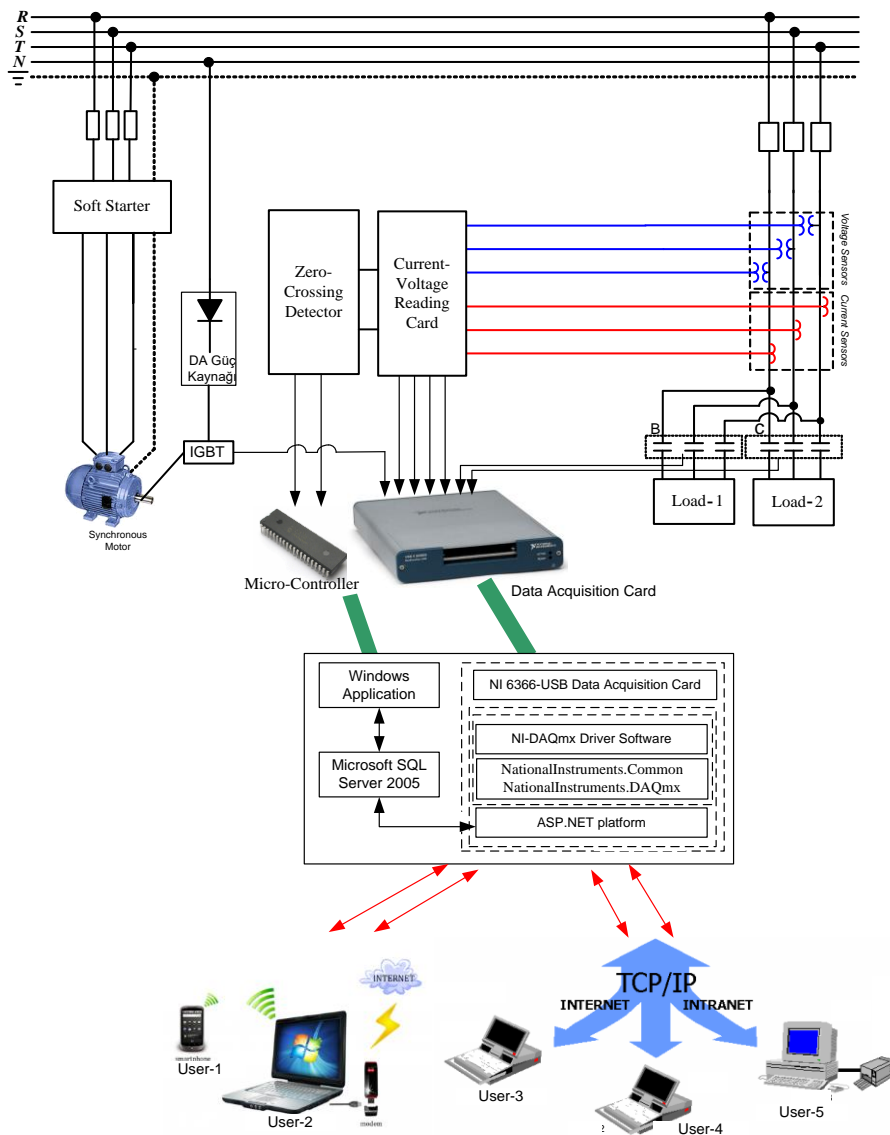


Fig. 3. Block diagram of system

Voltage transformers were used for each phase in obtaining alternating voltages. Cas-R 25 NP current sensors were used to measure the current amount drawn by the system from the network at each phase. When maximum 25A current flows through current sensor's primary circuit, 5V DC voltage is produced as output. The sensor also produces the output signal for the current zero-passing circuit in the form of AC signal.

Zero-crossing circuit was used while measuring power factor of the system. Power factor was produced using PIC microcontroller to calculate the square wave signals produced by this circuit. Circuit diagram of the zero-crossing detector designed in this scope is shown in Fig. 5.

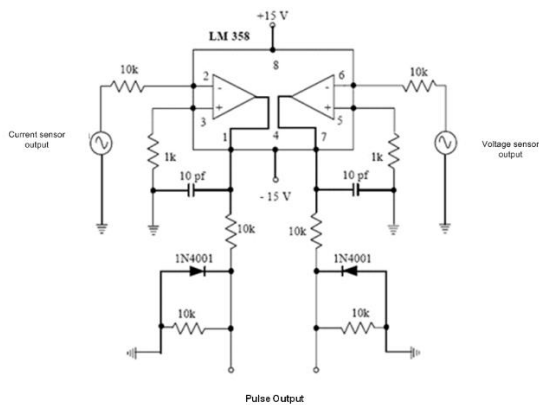


Fig.5. Zero-crossing detector

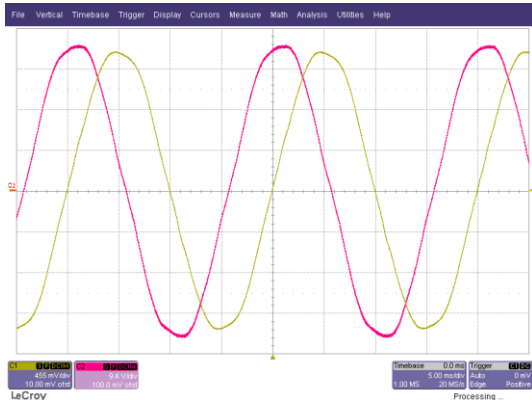
Signals applied to the input and signals obtained from the outlet of the zero-crossing detector are listed in Fig.6a and Fig.6b, respectively. Time difference between the positive tips of the voltage and current signals transformed into square wave is sensed by PIC and power factor value is obtained in such way that each second corresponds to 18 degrees.

Synchronous motor is started in the induction mode for the first start. Soft start method was adopted to run the synchronous motor in the induction motor mode.

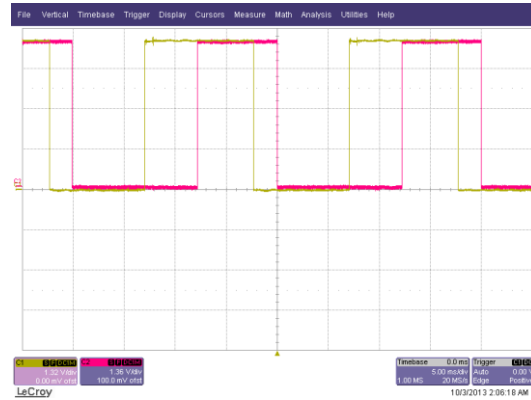
Switching frequency applied to IGBT drive circuit for adjustable direct voltage to be supplied to the excitation winding of the synchronous motor is shown in Fig.7. Switching frequency was set at 5 kHz.

3.2. Software Infrastructure

Computerization of system data, data monitoring and system control was performed using NI-6366 USB DAQ (Data acquisition Card) card produced by the National Instrument Co. This card connects with the computer through USB port. Fig.8 illustrates the block diagram of the structure to be used in processing data acquisition card through the interface.

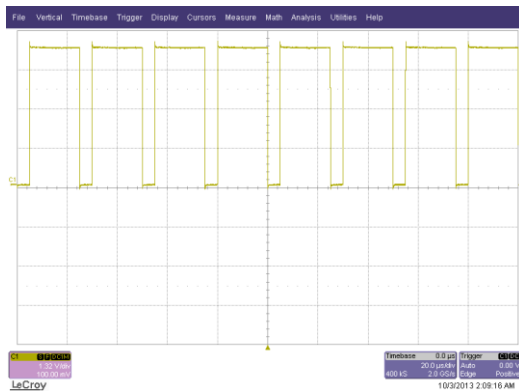


a) Current-voltage signal

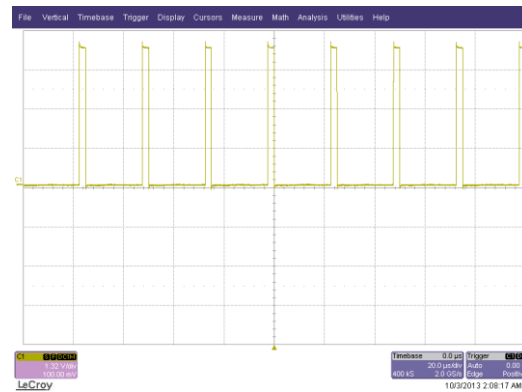


b) Current-voltage zero-crossing signal

Fig.6. Output signal of the zero-passing detector



(a) Switching signal at 70% duty cycle



(b) Switching signal at 5% duty cycle

Fig.7. Switching signals at different duty cycles

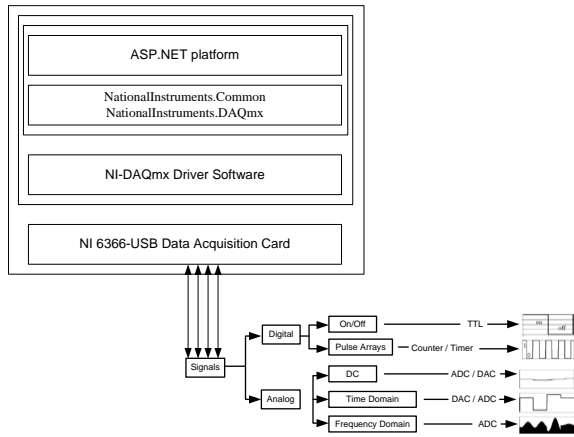


Fig. 8. Block diagram of data acquisition

User web interface was developed in Visual Studio ASP.NET platform. This platform was preferred thanks to its features such as performing driver applications, database management and communication with external equipment, which are impossible to be achieved by HTML codes. Moreover, in addition to its developed software infrastructure, it provides functionality to the web interface thanks to its visual components. Since the data acquisition card cannot process in the internal memory, system's power factor parameter is retrieved by the developed web application from the microcontroller through USB port and is stored in the database in the computer. Microsoft SQL Server 2005 database software was preferred as the study database.

4. EXPERIMENTAL STUDY

A general e-learning platform was developed to serve control and monitoring works over internet. As can be seen in Fig.9, this platform is composed of 2 main parts:

window display part and active part. Window display part is composed of theoretical expression pages which give information on subject and which are open to any user. The second part, active part, provides the application area. System control and monitoring processes are performed in this part.

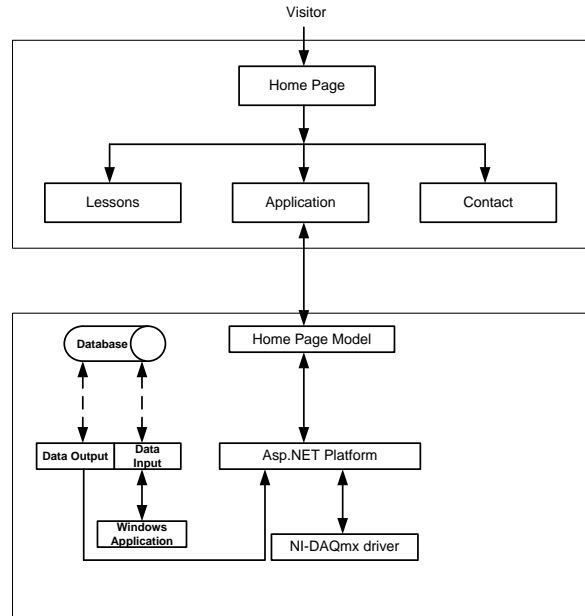


Fig. 9. Block diagram of the designed e-learning platform

Homepage of the web interface developed to enable system monitoring and control by users is shown in Fig.10. User web interface presents the purpose and importance of the thesis and block diagram of the study.

Application part of the study can be accessed by clicking the "Application" tab. The user can monitor and control the system on this page. This part is given in Fig.11.

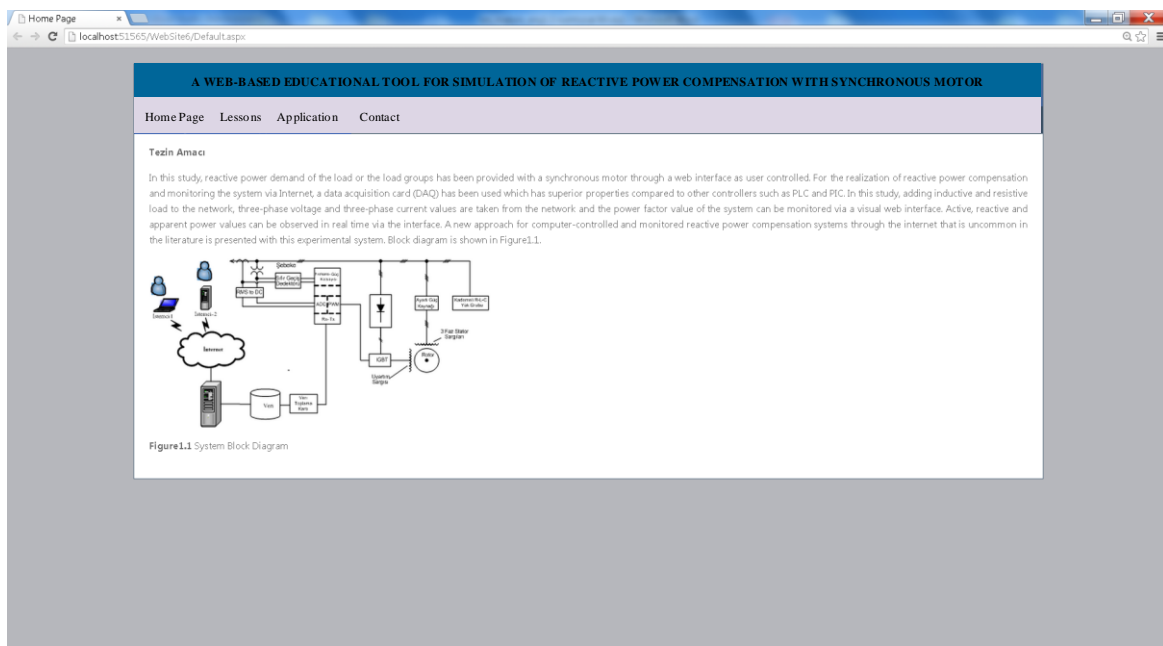


Fig.10. Homepage display

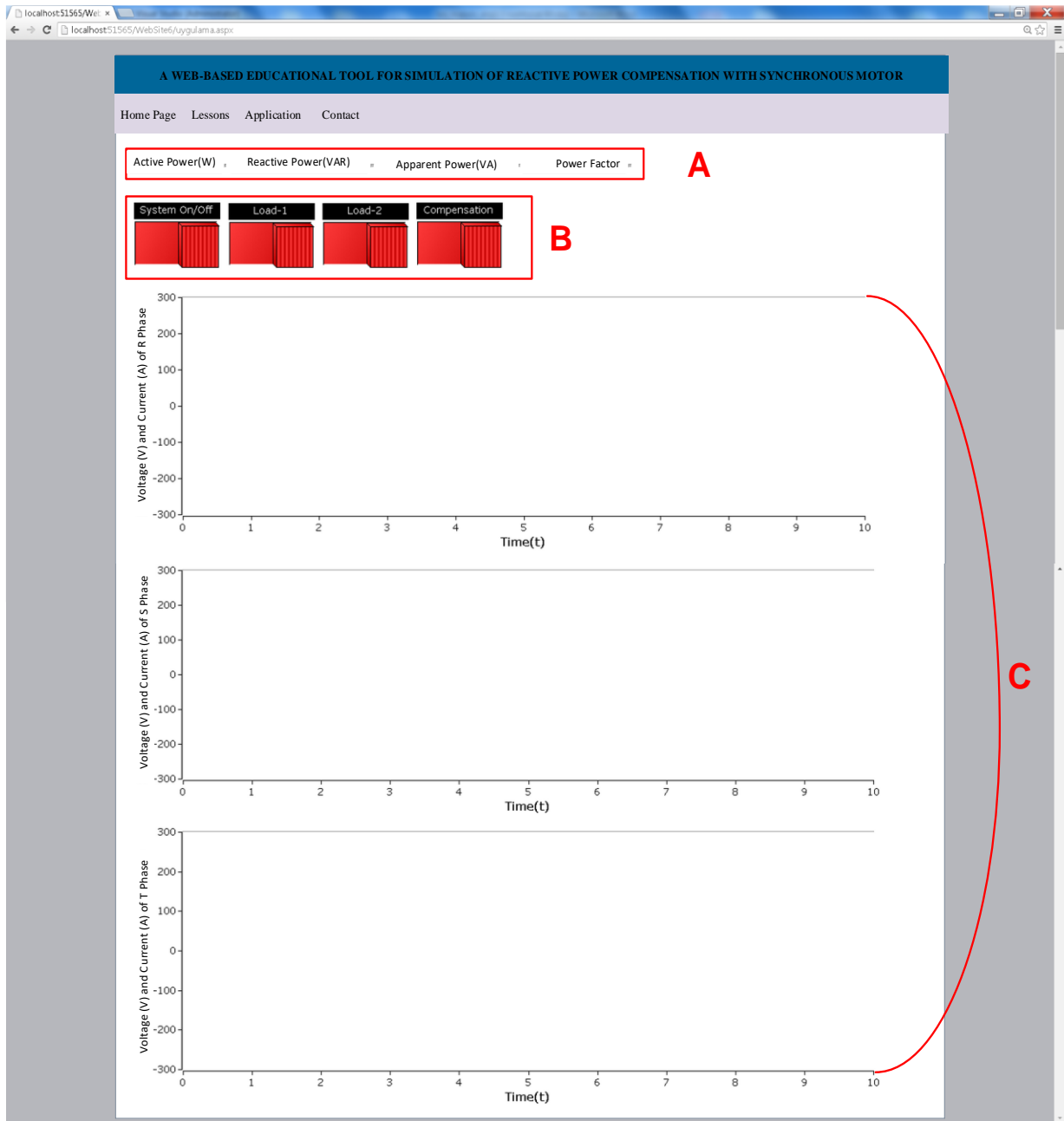


Fig.11. Picture of main webpage

A: Load management panel

This panel enables system On/Off and selection of the load or loads to be activated. By clicking System On/Off button, connection is ensured for system monitoring and control and load activation is enabled. In addition, when the system is activated, the synchronous motor runs parallel to the load run in the asynchronous mode.

B: Power monitoring panel

A part in this panel enables visual monitoring of the active, reactive and apparent power parameters belonging to the load or loads.

C: Graphic Window

Numerical system parameters are presented in graphics in this part. Graphics of current and voltage values are drawn for each phase separately in the interface.

Flow diagram ensuring stable operation of the software designed for the hardware is given in Fig.12. As can be concluded from the flow diagram, system's power factor was stabilized at 0.98, as specified in the standards.

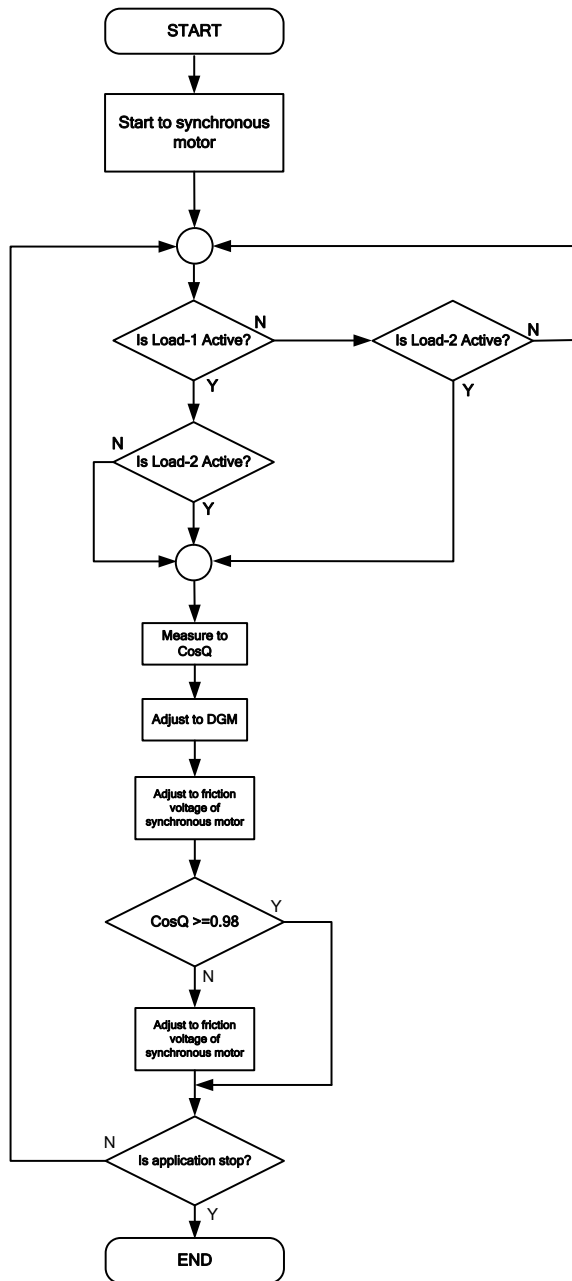


Fig.12. System operation algorithm

General view of the web-based educational tool for simulation of reactive power compensation with synchronous motor, which is designed and applied in the scope of the study, is shown in Fig.13.

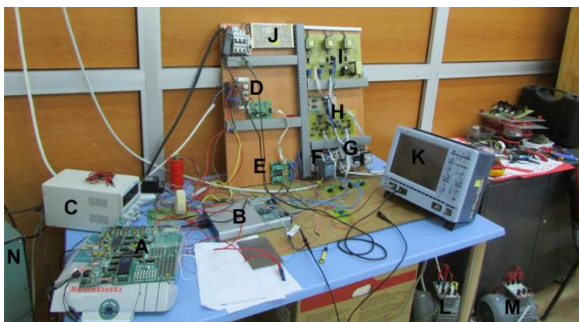


Fig. 13. Experimental Kit

When the first load is switch on; total active, reactive and apparent power and power factor parameters are calculated and displayed numerically in the user web interface as shown in Fig.14. and also the values obtained from the measurement device and illustrated in Fig.15 are observed to be nearly equal. Numerical values displayed in the interface shown in Fig.14a. Fig.14b shows web interface display developed when the user starts the system over internet by clicking "System on/off" button and switch on the first load.

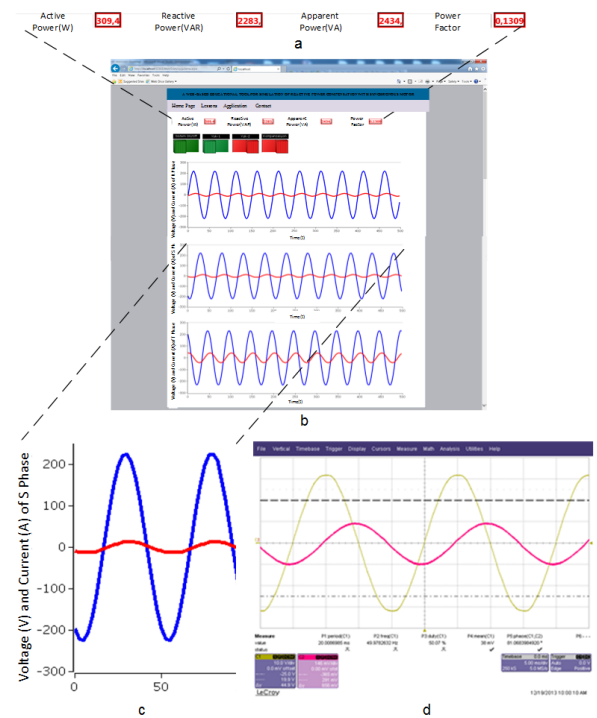


Fig.14. Interface and oscilloscope screenshot when the Load-1 is switch on

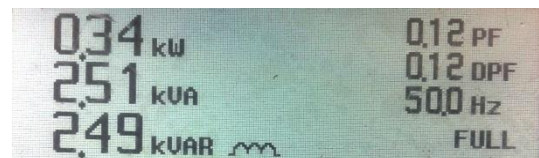


Fig. 15. System parameters and measurement device display when the Load-1 is switch on

When the user wants to perform compensation process when the first load is switch on and clicks the "Compensation" button in the web interface, application of DGM to the excitation windings of the synchronous motor at 52% duty cycle enables approximation of the power factor value (between the current and voltage) to 1, as in Fig.16a. After compensation, the power factor value increased from 0.1309 to 0.98, as in Fig.16a. Reactive power component, on the other hand, decreased from 2283 VAR to 55.89 VAR. Thus, at the end of the compensation process performed when the Load-1 was switched on, power factor value required by the compensation was achieved. Interface values shown in Fig.16a and the measurement device values presented in Fig.17 are observed to be nearly equal.

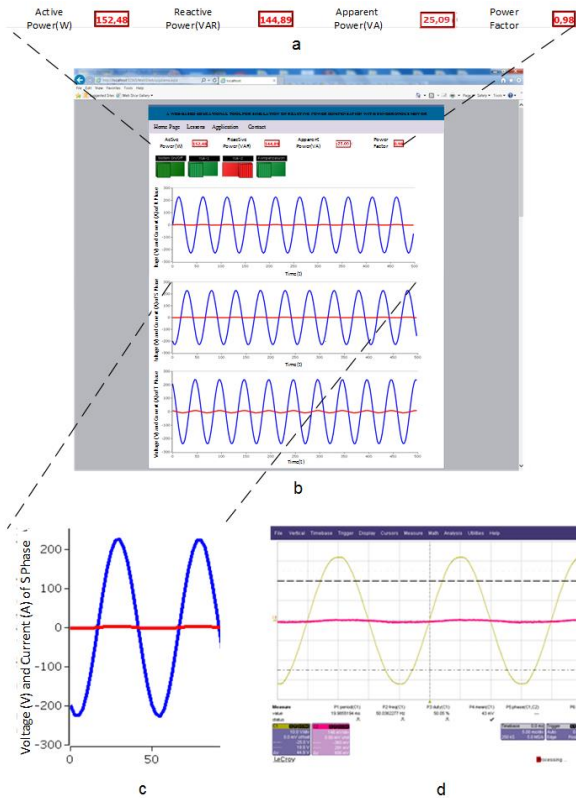


Fig.16. After compensation interface screenshot when the Load-1 is switch on

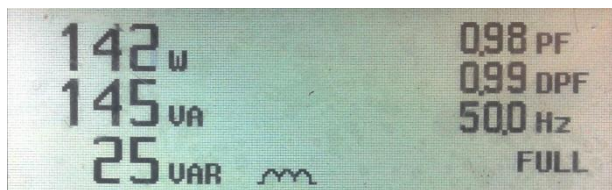


Fig. 17. After compensation measurement device display when the Load-1 is switch on

Comparison of the pre- and post-compensation oscilloscope displays of the current and voltage signals when the Load-1 is run (Figure 5.2-d and Figure 5.5-d) and the interface display shows that these signals are similar.

During analyses of the user web interface and oscilloscope images, real-time power factor parameter measurements were made as loads were run in the system during compensation by the user. By this way, current and voltage signals were kept at the same phase. After the changes made by the user in the interface were applied to the hardware, the change was reflected to the user web interface on real time basis. Pre-compensation system parameters are shown in Table.1. As can be concluded from the table, system parameters change dependent on working of the loads. Since the motors, functioning as load, run in idle mode, power factor values are recorded as seen in the table. Compensation process enables approximation of this value to 1.

When the user wants to perform compensation, reactive power is aimed to be zeroed. Table 2 shows that this value approximates to 0 and the power factor to 1.

4. CONCLUSIONS

With this experimental study, a hardware and software, which is controlled and monitored through computer over internet, has been successfully developed and run for simulation of reactive power compensation with synchronous motor, a study subject hardly studied by the related literature.

During the control phase, changes on the interface were sent to data acquisition card in a fast and appropriate manner to monitor the system response. Possible error cases were monitored on real time basis and required infrastructure was developed for remote-control trouble shooting. Moreover, only by changing the power of synchronous motor, a general-purpose experimental environment can be developed for any kind of energy-consuming load or load groups to be connected to the system. Use of visual components in the user web interface developed in this scope both makes learning more effective and differentiates this study from the rest. Moreover, distance realization of this application over internet has eliminated the risk of user inattention, measurement mistakes and possible electrical and mechanical negative developments.

Table 1. System parameters (before compensation)

Operation Mode	Active Power (W)	Reactive Power (VAR)	Apparent Power (VA)	Power Factor
Induction motor mode +Load-1	309.4	2283	2434	0.1309
Induction motor mode+ Load-2	318	2378	2535	0.1292
Induction motor mode + Load-1+Load-2	395.4	2788	2955	0.1452

Table 2. System parameters (after compensation)

Operation Mode	Active Power (W)	Reactive Power (VAR)	Apparent Power (VA)	Power Factor
Induction motor mode +Load-1	143.55	55.89	146.45	0.98
Induction motor mode+ Load-2	152.48	144.89	154.45	0.98
Induction motor mode + Load-1 + Load-2	225	60.19	229.45	0.98

Data acquisition tool lacks an internal memory and the capacity to process memory, which necessitated the use of two different controllers in practice. When considered as additional materials for educational, the study seems to have achieved its objectives.

REFERENCES

- 1) Tekin, A., Ata, F., "An internet based virtual laboratory developed for speed control of an induction motor using PI controller", *Firat Univ. Journal of Engineering*, 21:2, 161-172, (2009).
- 2) Vodyakho, O., Fleming, F., Steurer, M., Edrington, C., "Implementation of A Virtual Induction Machine Test Bed Utilizing the Power Hardware-in-The-Loop Concept", [*Electric Ship Technologies Symposium \(ESTS\), 2011 IEEE*](#), pp:52-55, (2011).
- 3) Kandemir, E., Duru, H., T., Çamur, S., Arifoglu, B., Beşer, E., "Experimental Realization and Simulation of Brushless DC Motor System", *Electrical-Electronics and Computer Engineering Symposium*, (2004).
- 4) Dumanay, A. B., Istanbulu, A., Demirtaş, M., "Remote laboratory implementation for speed control of DC motor with PWM", *Electrical, Electronics Biomedical Engineering Computer Training, IV. National Symposium*, (2009).
- 5) Güner, Y., "Prepared as E-Learning of Data Collection, Data Processing and Data Preparation with LabView Program", Marmara University, Science Institute Electrical Education Department, *Master Thesis*, (2005).
- 6) Gelen, A., Yalçınöz, T., "PI control of thyristor switched capacitor (TSC) and thyristor switched reactor-based static VAR compensator (TSR-Based SVC)", *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ. Vol 24*, No 2, 237-244, (2009).
- 7) Coteli R., Aydogmus Z., "Reactive power compensation by PWM-Statcom", *Journal of Polytechnic*, Cilt: 10 Sayı: 2 s.123-128, 2007 Vol: 10 No: 2 pp.123-128, (2007).
- 8) Sesveren, O., "Reactive Power Compensation Education Set for ANN Based Systems", *Master Thesis*, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, (2008).
- 9) Bilki F., "Reactive Power Compensation with PLC Control", *Master Thesis*, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, (2008).
- 10) Baran, L., "A PLC Based Monitoring and Control of Power Factor of A Three Phase Induction Motors", *Master Thesis*, Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, (2010).
- 11) Bayındır, R., Görgün, A., "A compensator application using synchronous motor with a PI controller based on PIC", *Pamukkale University Engineering Faculty, Journal of Engineering Sciences*, 15: 87-99, (2009).
- 12) Bayram, M., "Reactive Power Compensation of Power Installations", *Birsen Publication*, Istanbul, Turkey, (2010).
- 13) Colak, I., Synchronous Motors, *Gazi University, Technical Education Faculty*, Ankara, Turkey, (2010).
- 14) Kareem A. H., "Microcontroller Based Active and Reactive Power Measurement", *International Journal of Computational Engineering Research (IJCER)*, Vol-4, pp:11-18, (2014).
- 15) Deusinger, B., Lehr, M., Binder, A., "Determination of efficiency of permanent magnet synchronous machines from summation of losses", *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 619-624, (2014).
- 16) Bayındır R., Colak I., Kabalcı E., Görgün A., "PID controlled synchronous motor for power factor correction", *2nd International on Power Engineering, Energy and Electrical Drives POWERENG-2009*, Portugal, 141-159, (2009).
- 17) Colak, I., "Asynchronous Motor", *Seçkin Press*, 20-35, Ankara, Turkey, (2008).
- 18) Sarıoğlu, M. K., Gokasan, M., Bogosyan, S., "Asynchronous Motors and Control", *Birsen Press*, 2009.
- 19) Shin, K., Choi, J., Cho, H., "[Characteristic Analysis of Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine with Fractional-Slot Concentrated Winding Considering NonlinearMagnetic Saturation](#)", *IEEE Transactions On Applied Superconductivity*, Vol:26, 2016.
- 20) Rashid M.H., "Power Electronics", *Prentice Hall*, 106-114 (2011).
- 21) Sesveren, O., "ANN software based on object and simulation of reactive power compensator with synchronous motor", *Gazi University, Graduate School of Natural and Applied Sciences*, (2008).

Model Based Predictive Engine Torque Control for Improved Driveability

Murat ÖTKÜR¹ Orhan ATABAY², İsmail Murat EREKE³

Ford Otosan, 34885 Sancaktepe İstanbul / Türkiye
 İTÜ Makina Fakültesi, 34437 Gümüşsuyu İstanbul / Türkiye
 İTÜ Makina Fakültesi, 34437 Gümüşsuyu İstanbul / Türkiye
 (Received : 18.03.2016 ; Accepted: 28.04.2016)

ABSTRACT

An engine brake torque based Model Predictive Control (MPC) algorithm with an additional anti-shuffle control element is developed to manipulate the pedal map oriented brake torque demand signal in an automotive powertrain application. In order to capture the longitudinal vehicle dynamics of a front wheel drive vehicle, a simplified 4 mass powertrain model is generated. Model validation is performed with vehicle tests using a typical tip-in and back-out acceleration pedal signal input manoeuvre. Comparison of simulation results and vehicle tests reveals that simplified model is capable of capturing vehicle acceleration profile with the error states for the specified input signals. MPC scheme based on 2 mass vehicle model is developed in "MATLAB / Simulink" environment to obtain a smooth and responsive acceleration profile without error states like excessive jerks and shuffles. An additional engine to wheel speed difference based proportional controller employed in order to further reduce powertrain oscillations without compromising from system response speed. Simulation results indicate that MPC plus P Controller is capable of obtaining desired acceleration and deceleration profiles achieving improved driveability.

Keywords: Drivability, Driveline Modelling, Model Predictive Control.

ÖZ

Bu çalışmada otomobil aktarma organları tork kontrolünde kullanılmak üzere gaz pedalı haritasına bağlı oluşturulan sinyalin düzenlenmesi için, anti-salınım elemanı içeren tork modelli öngörümlü kontrolcü geliştirilmiştir. Önden çekişli bir aracın doğrusal dinamiğini simule etmek için basitleştirilmiş 4 kütleli bir araç modeli kullanılmıştır. Model doğrulaması araç yol testinde gaz pedalına basma ve gaz pedalından çekme manevraları kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon ve araç testlerinin karşılaştırılması sonucunda kullanılan 2 kütleli araç modelinin, hata modlarını da içeren araç hızlanma profilini simule etmek için yeterli olduğu görülmüştür. "MATLAB / Simulink" yazılım ortamında "Model Öngörümlü Kontrolcü" kullanılarak sarsıntı ve yüksek salınım gibi hata modları içermeyen ve düzgün ve performanslı bir ivmelenme profili oluşturulmuştur. Mevcut düşük genlikli salınımlar da motor ve araç hızı farkına bazlı çalışan ek bir doğrusal kontrolcü ile tamamen ortadan kaldırılmıştır. Simülasyon sonuçları, "Model Öngörümlü Kontrolcü" nün doğrusal kontrolcü ile birlikte kullanılmasının hızlanma ve yavaşlama manevraları için iyileştirilmiş sürüş özellikleri sağladığını göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Sürüş Özellikleri, Aktarma Organları Modellemesi, Model Öngörümlü Kontrol.

1. INTRODUCTION

New technologies as a result of the research and developments activities in electronics resulted with complex electro-mechanical systems equipped automobiles in order to cope with regulatory requirements and elevated customer expectations. As a result, power and torque capability of the modern engines increased significantly in the last decades. Unlike conventional automobiles where acceleration pedal input is mechanically connected to a fuel/air throttle valve, modern vehicles are equipped with electro-mechanical systems where acceleration throttle pedal input signal is captured by an electronic control unit, processed and finally used to control the produced torque and the parameters for the combustion system. When triggered with a high amount of torque change as a result of acceleration pedal response, low frequency oscillations may occur if the driveability calibration of the powertrain is inadequate (Figure 1). These low frequency

oscillations correspond to the first resonance frequency of the driveline and typical resonance frequencies are 2-8 Hz depending on gear for manual transmission passenger vehicles [1]. They also interact with human body frequencies and have great impact on driving comfort, therefore need to be avoided.

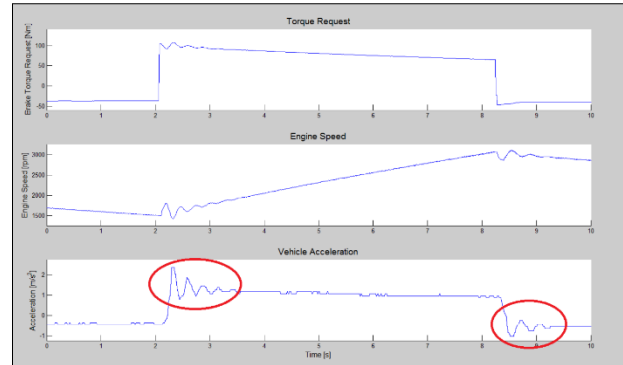


Fig. 1. Vehicle response for a tip-in & tip-out response showing error states; Top sub-figure: Engine brake torque request, Mid sub-figure: Engine speed measurement, Bottom sub-figure: Vehicle longitudinal acceleration measurement.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: motkur@ford.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 71-82

Automotive manufacturers' engine control algorithms already employ so-called anti-jerk feature. Anti-jerk works in an open loop manner using look-up tables and main control strategy is to slew the pedal oriented torque request especially in backlash transition region and do not have close loop feedback control. The drawback of anti-jerk feature is it is a subjective calibration methodology and outcome is strongly dependant on calibrator's performance. Additionally filling look-up tables for all gear, engine speed and pedal position combinations requires significant amount of development time. Considering these obstacles of the current driveability features, the subject of automated torque control for improved driveability attracts attention of many automotive manufacturers and researches as it can be described as an optimization problem dealing with performance and comfort counter measures.

There are a large number of studies reported in the area of automated engine torque control.

Fredriksson et al. was one of the first researchers that employed the idea of using engine as an actuator in order to actively damp the powertrain oscillations [2]. Subjected study involves different linear controllers such as PID, "Pole Placement" and "LQG/LTR" controllers. These were assessed using criteria like transient performance, parameters and noise sensitivity. The proposed "LQG/LTR" controller is evaluated as the most suitable of the investigated controllers as it is easy to tune, works satisfactory both in simulations as well as in real field trials. Baumann et al. developed two different control methodologies for anti-jerk control: A H_∞ controller using mixed sensitivity approach [3] and a model based predictive controller using Smith predictor approach to cover the system inherent dead-time [4], controller gains were determined using root locus method. Both studies uses speed difference as input variable and produces corrective torque as output. An analogy to classical PD-controller has been drawn and superiority of the proposed methodology is demonstrated on the latter study. Similarly Pettersson and Nielsen proposed a speed-control strategy that included the behaviour of the driveline in the control scheme [5]. The model based state-feedback controller calculates fuel amount reducing the low frequency driveline oscillations. Berriri et al. developed a partial torque compensator in order to actively damp powertrain oscillations [6]. Like the previous studies the controller employs the engine speed as input to provide the corrective torque that will oppose to the shuffle. The study differs from previous studies in that the control synthesis is more or less independent of the driveline characteristics and non linearities using a simplified model of the engine without the precise characteristics of the driveline. Superiority of the methodology is that it may be tuned directly on the vehicle, considering the fact that post design tuning parameters are few and with clear meanings, the benefit over the previous approaches is a reduced cost and time for development. Webersinke et al. proposed two linear quadratic controllers: a comfort

controller, which damps the driveline oscillations and a dynamic controller which guarantees a high dynamical performance [7]. Both control algorithms show improvement on system performance: enhanced driving comfort with reduced driveline resonances without loss of dynamics. Templin et al. developed an LQR-formulation of a driveline anti-jerk controller which acts as a torque compensator which does not require any state reference trajectories [8]. The controller is extended with an optimization based handling of the backlash transition that limits the shunt phenomenon [9]. At both of the studies, results were verified by measurements in a heavy duty truck and show good improvement with respect to non-controller case. As a discrepancy to the previous studies He et al. established a torque-based nonlinear predictive control approach with an additional torque load estimation component [10]. Torque load estimation component is based on a mean value model of the internal combustion engine. A proportional-integral observer is employed to estimate the torque load of the powertrain and a torque-based nonlinear predictive controller is designed by use of iterative optimization. One of the latest studies on the subject topic is held by Fang et al. [11]. Subjected study involves a new model reference approach using engine speed as a control objective letting the engine speed output follow the referred speed at any time by forcing the plant transfer function. A comparison of the used methodology with classical state space and PID controllers shows that the proposed controller had better performance on speed, acceleration and torque control aspects.

2. DRIVELINE MODELLING

Vehicle powertrain consists of various components starting from engine to tyres. These are complex structures such as flywheel, clutch, gearbox, differential (final drive), drive shafts and wheels (Figure 2) forming a high order system including nonlinearities even for a front wheel drive (FWD) vehicle. Although most of the components are made from steel, due to high amount of torque transported and geometrical constrains, the overall system cannot be treated as completely rigid.

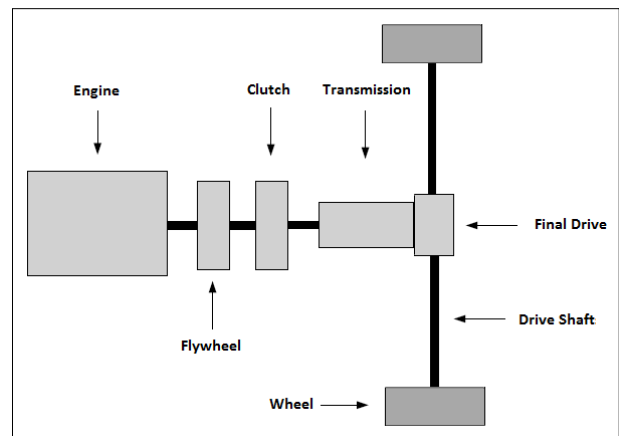


Fig. 2. Components of vehicle driveline for a FWD vehicle.

Especially because of the components with spring mechanisms such as dual mass flywheel (DMF) and clutch, shape of the drive shafts - long cylinders with a small diameter (hollow in some applications); when triggered by a large amount of torque, the response of the overall system degrades compared to a rigid system. In order to utilize a controller mechanism a simplified model that is capable of capturing the system dynamics is required. Several driveline models have been proposed in the literature, 2 mass models are the most common ones. This study composes of 2 different driveline models: a 4 mass vehicle model with road load component for simulating longitudinal vehicle dynamics and a simplified 2 mass vehicle model for controller utilization purpose. It has been verified that 2 mass vehicle model is accurate enough to employ the model based predictive torque control algorithm. As the aim of this study is to develop a close loop driveability algorithm for real world applications, 4 mass vehicle model is used as replacement environment for the subjected vehicle in order to employ 2 mass vehicle model based control algorithm. 4 mass vehicle model validation is performed with vehicle tests and had showed good results.

2.1. Four Mass Vehicle Model

When studying driveline of a front wheel drive vehicle, clutch and drive shafts are subjected to relatively highest torsional deformation resulting possibility for oscillations. In order to capture longitudinal vehicle dynamics characteristics these components should be modelled with flexible elements (Figure 3).

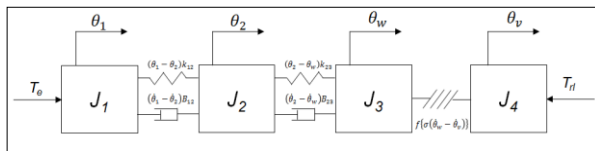


Fig. 3. Free body diagram of 4 mass vehicle model with 4 inertias connected by 2 spring damper elements and tyre.

4 mass vehicle model consists of the components below:

- Integrated inertia node 1 (J_1): Engine, flywheel, clutch primary side
- Flexible element # 1: Clutch
- Integrated inertia node 2 (J_2): Clutch secondary side, transmission, final drive
- Flexible element # 2: Drive shafts
- Wheel and tyre inertia, node 3 (J_3)
- Tyre dynamics
- Vehicle inertia, node 4 (J_4)

Applying Newton's second law to each of the inertia components results with below differential equations.

$$J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 = T_e - (\theta_1 - \theta_2)k_{12} - (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)B_{12} \quad (1)$$

$$J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 = (\theta_1 - \theta_2)k_{12} + (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)B_{12} - (\theta_2 - \theta_w)k_{23} - (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_w)B_{23} \quad (2)$$

$$J_3 \cdot \ddot{\theta}_w = (\theta_2 - \theta_w)k_{23} + (\dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_w)B_{23} - f\{\sigma(\dot{\theta}_w - \dot{\theta}_v)\} \quad (3)$$

$$J_4 \cdot \ddot{\theta}_v = f\{\sigma(\dot{\theta}_w - \dot{\theta}_v)\} - T_{rl} \quad (4)$$

where

- θ_x , $\dot{\theta}_x$ and $\ddot{\theta}_x$ are the angular position, velocity and acceleration of the x^{th} node respectively,
- k_{xy} and B_{xy} are the stiffness and damping coefficients of the spring-damper elements between x^{th} and y^{th} nodes respectively,
- T_e is the generated engine brake torque at crankshaft level,
- Road load is modelled as the sum of the aerodynamic, rolling and grade resistance forces as below (x),

$$T_{rl} = r_w \cdot (F_{aero} + F_{rr} + F_g) \quad (5)$$

where

$$\circ F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot C_D \cdot v^2 \quad (6)$$

$$\circ F_{rr} = m_{tot} \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot f_r \quad (7)$$

$$\circ F_g = m_{tot} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (8)$$

- $f\{\sigma\}$ is the tyre/road friction force function,
- J_1 is the total inertia of engine, flywheel and clutch primary side,

$$J_1 = J_e + J_{fw} + J_{cp} \quad (9)$$

- J_2 is the total inertia of clutch secondary side, transmission, final drive and drive shafts,

$$J_2 = J_{cs} + \frac{J_t}{i_t^2} + \frac{J_{fd}}{i_t^2 \cdot i_f^2} + \frac{J_{ds}}{i_t^2 \cdot i_f^2} \quad (10)$$

where

- i_t is the reduction ratio of the selected gear

- i_f is the reduction ratio of the final gear

- J_3 is the total inertia of wheels including tyres at crankshaft level

$$J_3 = 4 \frac{J_w}{i_t^2 \cdot i_f^2} \quad (11)$$

- J_4 is the total inertia of the vehicle mass at crankshaft level

$$J_4 = m_{tot} \cdot \left(\frac{r_w}{i_t \cdot i_f} \right)^2 \quad (12)$$

Flexible elements (clutch and driveshafts) in the vehicle model were modelled using spring/damper simulation block generated in "MATLAB / Simulink". This block aims to accurately calculate the torque generated when a displacement occurs on either side.

Tyre dynamics is simulated using the well-known Pacejka's magic tyre formula [12]. Tyre slip is calculated via dividing the speed delta between the tyre circumference and the vehicle with absolute vehicle

speed. The coefficient of friction within the tyre-road interface is obtained from a lookup table and used to calculate the tractive effort.

2.2. Two Mass Vehicle Model for Controller Design

Due to high level of nonlinearities at the 4 mass vehicle model, model predictive control algorithm cannot be operated successfully. Therefore a simplified 2 mass vehicle model with road load component has been developed for the model predictive controller plant usage. Driveshafts have been assumed as the main source for the elasticity, resulting a 2 mass system combined with a spring / damper element (Figure 4).

2-mass vehicle model consists of components below:

- Integrated inertia node 1 (J_1): Engine, flywheel, clutch primary & secondary sides, transmission and final drive
- Flexible element # 1: Driveshafts
- Integrated inertia node 2 (J_2): Wheels, tyres and vehicle

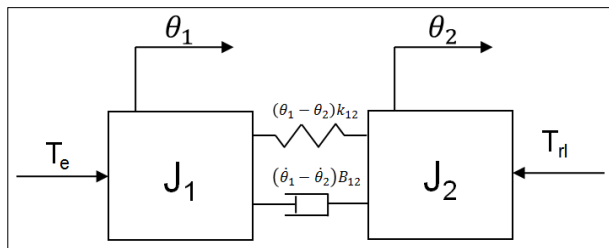


Fig. 4. Free body diagram of simplified 2 mass vehicle model.

Applying Newton’s second law to each of the inertia components results with below differential equations.

$$J_1 \cdot \ddot{\theta}_1 = T_e - (\theta_1 - \theta_2)k_{12} - (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)B_{12} \quad (13)$$

$$J_2 \cdot \ddot{\theta}_2 = (\theta_1 - \theta_2)k_{12} + (\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)B_{12} \quad (14)$$

where

- θ_x , $\dot{\theta}_x$ and $\ddot{\theta}_x$ are the angular position, velocity and acceleration of the x^{th} node respectively,
- k_{12} and B_{12} are the stiffness and damping coefficients of modelled the spring-damper elements of the drive shafts respectively,
- T_e and T_{rl} are engine brake torque and road load resistive torque calculated at crankshaft level respectively,
- J_1 is the total inertia of engine, flywheel, clutch primary & secondary sides, transmission, final drive

$$J_1 = J_e + J_{fw} + J_{cp} + J_{cs} + \frac{J_t}{i_t^2} + \frac{J_{fd}}{i_t^2 \cdot i_f^2} \quad (15)$$

- J_2 is the total inertia of drive shafts, wheels, tyres and vehicle mass

$$J_2 = \frac{J_{ds}}{i_t^2 \cdot i_f^2} + 4 \cdot \frac{J_w}{i_t^2 \cdot i_f^2} + m_{tot} \cdot \left(\frac{r_w}{i_t^2 \cdot i_f^2} \right)^2 \quad (16)$$

3. VALIDATION OF SIMULATION RESULTS VIA VEHICLE TESTS

4 mass vehicle model validation was performed via real world experiments carried out on a CD class front wheel drive (FWD) passenger vehicle equipped with a diesel engine. The engine had a regulated 2 stage (R2S) turbocharger system. Vehicle had a 6 speed wet dual clutch transmission and test weight was approximately 2125 kg. Engine and vehicle properties are summarized in Table 1. Tests were performed at manual mode and transmission kick-down function – which downshifts automatically if the accelerator brake pedal is pressed more than a certain position (close to maximum) very rapidly - had been disabled in order to reach maximum torque without downshifting during the wide open throttle (WOT) manoeuvre. Gearbox had torque truncation protection in low gears; therefore test manoeuvres were done at 3rd and 4th gears where maximum allowed torque values are 400 Nm and 450 Nm respectively. Test manoeuvre consists of a stabilized deceleration with zero accelerator pedal position from 2400 rpm to 2000 rpm engine speed followed by sudden tip-in to 100% pedal position with engine speed acceleration up to 3000 rpm. Manoeuvre is finalized a quick tip-out of the accelerator pedal to 0% and stabilized deceleration to 2500 rpm engine speed Figure 5). All ECU driveability features like anti-jerk and anti-shuffle were disabled in order to get an unfiltered torque request from the pedal input. Black smoke limitation feature was not turned off as disabling the feature will provide torque error such that injected fuel will not burn completely due to lack of combustion air, resulting degradation on vehicle model validations. Engine speed, vehicle speed, vehicle acceleration and ECU estimated brake torque signals were captured online via direct A7 connection to ECU.

Table 1. Engine and vehicle properties.

Engine Displacement	2.0 lt
Number of Cylinder	4
Rated Power	210PS (3750)
Rated Torque	450 Nm (2000-)
Transmission	6 Speed
Drive Wheel Configuration	Front Wheel
Final Drive Ratio	3.55
Tire Dimensions	245/50R17
Test Weight	2125 kg

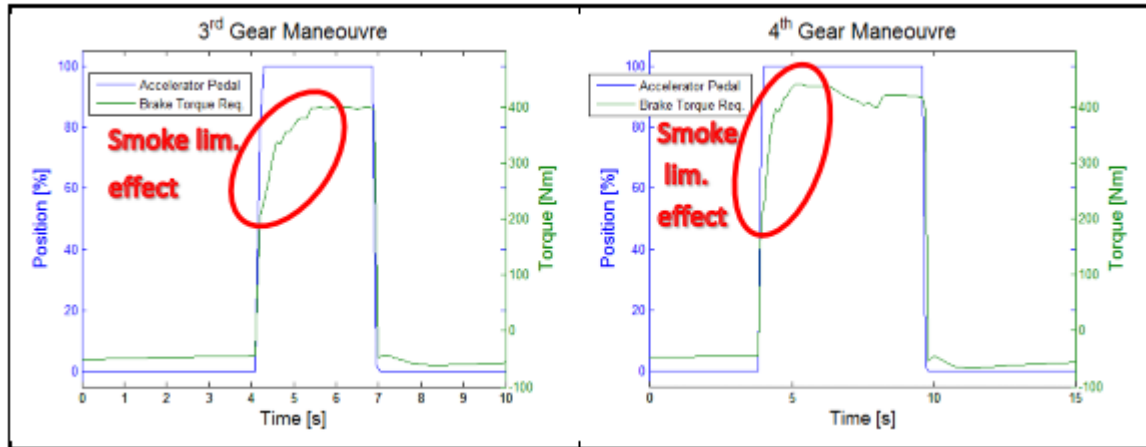


Fig. 5. Accelerator pedal position and brake torque request trace for the 3rd and 4th gear tip-in and tip-out manoeuvres.

Comparison of simulation results with vehicle measurements shows that 4 mass vehicle model is capable of simulating vehicle characteristics. Figure 6 contains vehicle acceleration, vehicle speed and engine speed response for a 3rd gear tip-in and tip-out manoeuvre. Acceleration axis has been normalized in terms of securing intellectual properties. Comparison of simulation and vehicle measurements clearly identifies that 4 mass vehicle model reflects subjected quantities in good correlation with vehicle measurements. For steady state conditions (stabilized deceleration and acceleration) proposed model delivers precise predictions, ensuring good accuracy of engine and vehicle parameters used in the model. Zoomed view of vehicle longitudinal acceleration comparison ensures that proposed vehicle model successfully captures powertrain characterization

as amplitude and frequency of the oscillation are in good alignment (Figure 7). However damping rate of the oscillations is slightly lower at the simulations. This is mainly due to pitch motion of the vehicle. Vehicle longitudinal acceleration sensor is mounted to the chassis and proposed vehicle model do not contain any powertrain – chassis connection mechanisms such as suspension system and assumed completely rigid. Therefore pitch motion is not captured at the proposed vehicle model. Figures 8 and 9 contains vehicle acceleration, vehicle speed and engine speed response for 4th gear tip-in and tip-out manoeuvres. Comparison of simulation and vehicle measurements shows that simulation results are in good alignment with the vehicle measurements for 4th gear tip-in and tip-out manoeuvres.

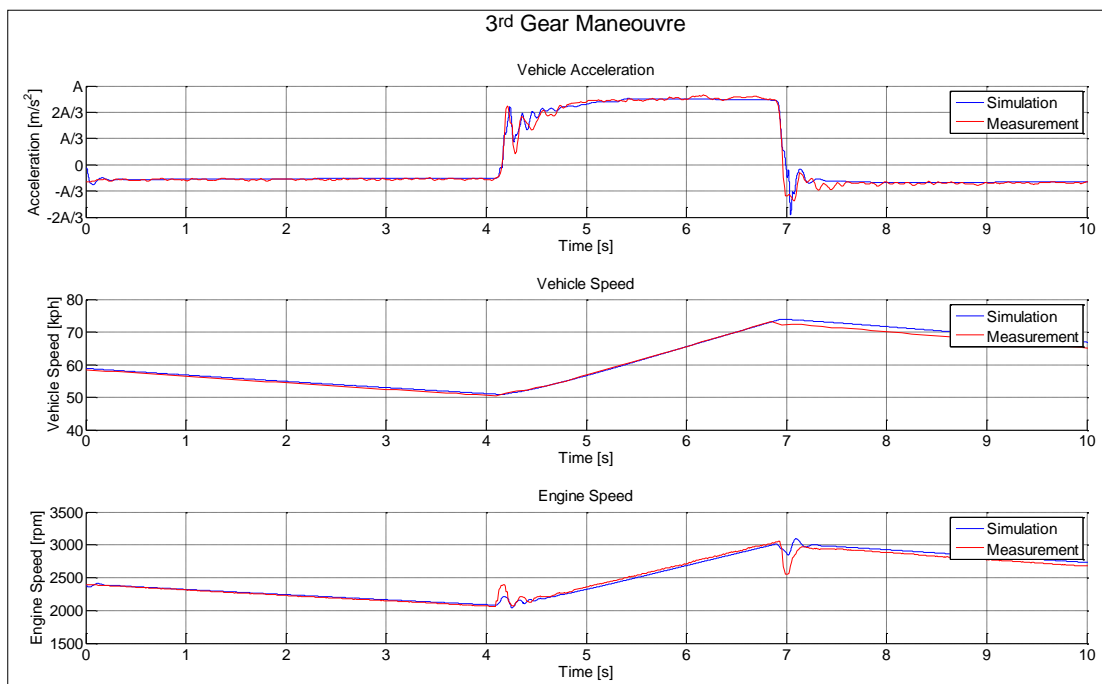


Fig. 6. Comparison of vehicle measurements and simulation results for 3rd gear tip-in and tip-out manoeuvre; Top sub-figure: Vehicle longitudinal acceleration, Mid sub-figure: Vehicle speed, Bottom sub-figure: Engine

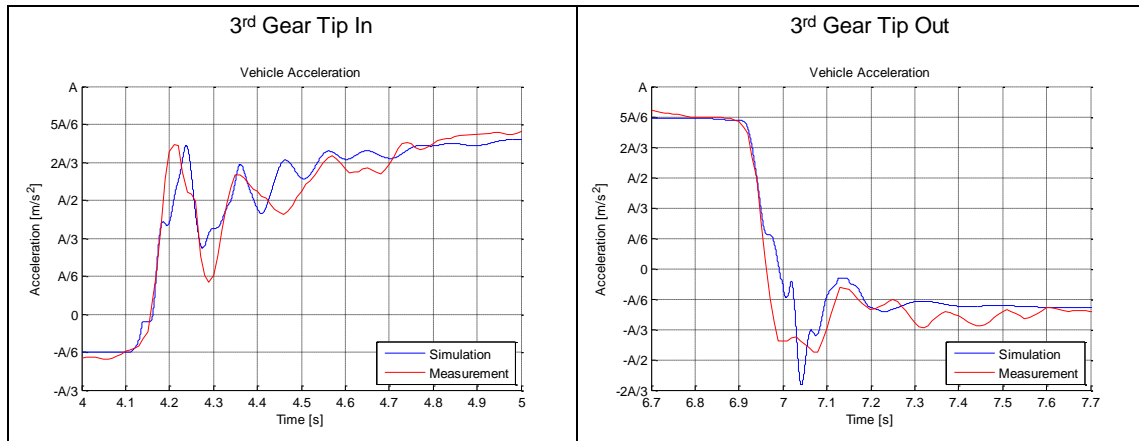


Fig. 7. Comparison of vehicle longitudinal acceleration measurement and simulation results for 3rd gear tip-in (left) and tip-out manoeuvres (right).

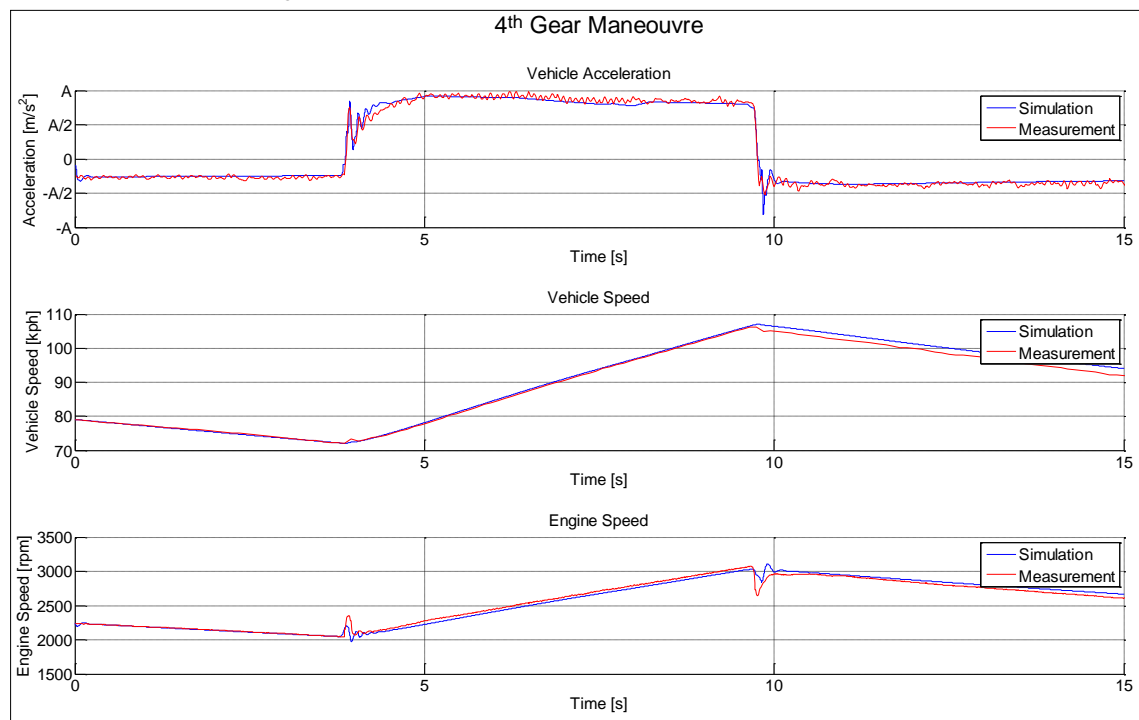


Fig. 8. Comparison of vehicle measurements and simulation results for 4th gear tip-in and tip-out manoeuvre; Top sub-figure: Vehicle longitudinal acceleration, Mid sub-figure: Vehicle speed, Bottom sub-figure: Engine speed.

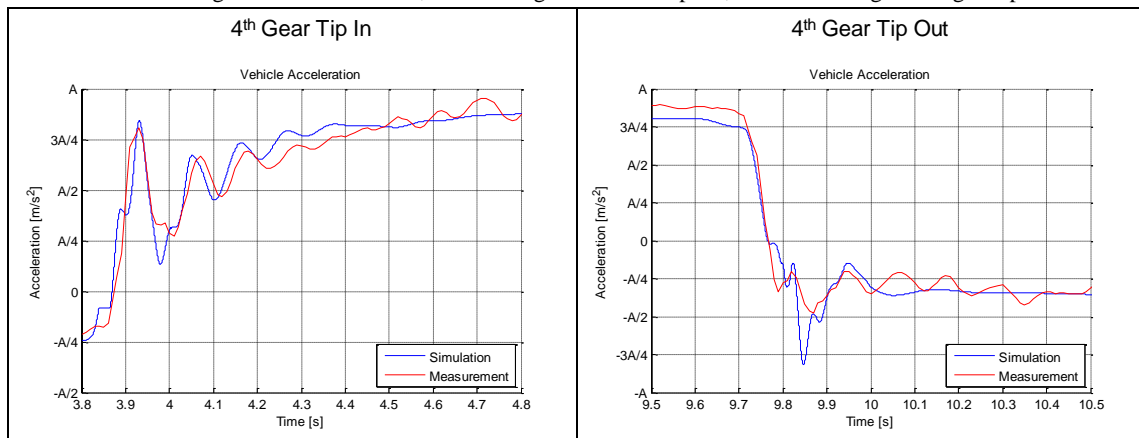


Fig. 9. Comparison of vehicle acceleration measurement and simulation results for 4th gear tip-in (left) and tip-out manoeuvres (right).

4. CONTROLLER DESIGN

MPC can be used for longitudinal vehicle torque control due to its ability to handle input and output constraints under finite horizon constrained optimal control framework. Once plant model is defined accurately, tuning of the MPC is easy due to intuitive controller concept. Moreover MPC includes feed forward control that acts against measured disturbances such as accessory losses in automotive applications which favours usage in automotive torque control applications, however accessory losses are not subjected within the content of this study.

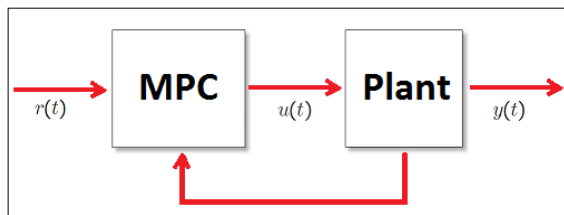


Fig. 10. Model based predictive control concept.

A basic formulation of the cost function used at the optimizer of the MPC can be described as follows:

$$\min_{u_t, \dots, u_{t+N-1}} \{ \sum_{k=0}^{N-1} \|y_{t+k} - r(t)\|^2 + \rho \|u_{t+k} - u_r(t)\|^2 \} \tag{17}$$

subjected to

$$\begin{aligned} x_{t+k+1} &= f(x_{t+k}, u_{t+k}) \\ y_{t+k} &= g(x_{t+k}, u_{t+k}) \\ u_{min} &\leq u_{t+k} \leq u_{max} \\ y_{min} &\leq y_{t+k} \leq y_{max} \\ x_t &= x(t), k = 0, \dots, N - 1 \end{aligned} \tag{18}$$

Where u_{min} and u_{max} are the plant input constrains, for the subjected problem friction torque and maximum available torque, similarly y_{min} and y_{max} are the minimum and maximum acceleration quantities for that specific

gear. Constraining inputs is definitely required due to the fact that MPC controller can result with a higher torque request that the engine can deliver.

For the proposed study MPC setup parameters are defined as follows (Figure 11):

- Control interval: 0.01s
- Predicted horizon intervals: 100
- Control horizon intervals: 40

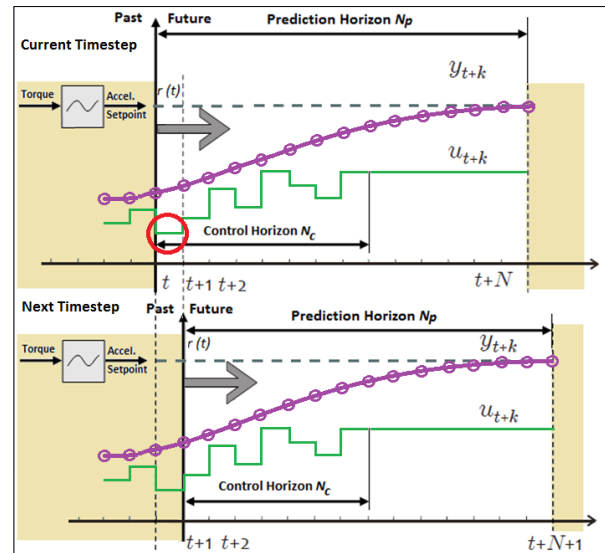


Fig. 11. MPC operation for single input single output system.

MATLAB/Simulink model of the 2 mass vehicle model with controller is shown at figure 12. Road load resistant force at crankshaft level is subtracted from the driver acceleration pedal request torque and multiplied by 1/total inertia value in order to achieve the vehicle acceleration request which is used as the reference desired setpoint value for the MPC controller. Modelled vehicle acceleration value is taken as the input to the controller with engine brake torque values as the control variable. Additional P controller using engine and vehicle speed difference value as input variable generates a

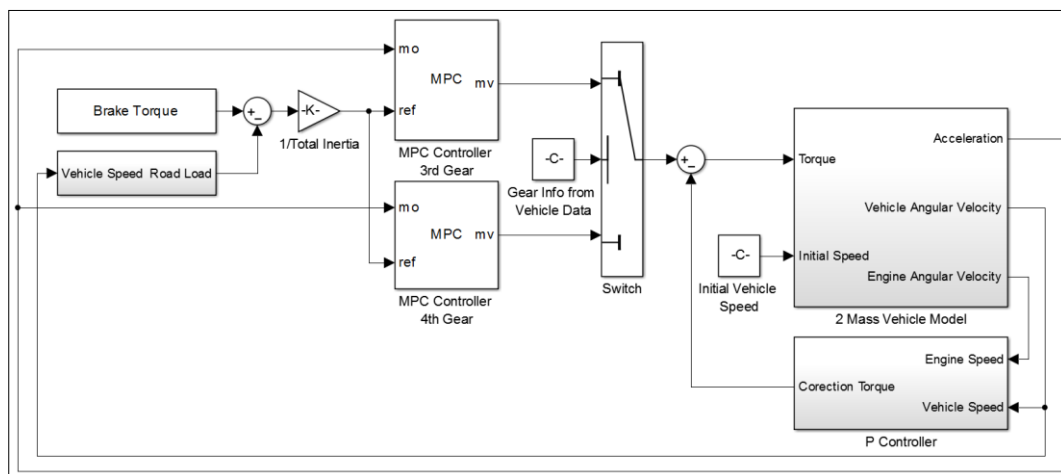


Fig. 12. MATLAB/Simulink model with MPC & P-controller.

corrective torque which is subtracted from the MPC controller output value in order to obtain a smoother acceleration profile.

MATLAB/Simulink model of the 2 mass vehicle model is shown at figure 13. 2 inertias (Figures 14 & 15) were combined with spring damper element (Figure 16). Nonlinear spring and damper characteristics of the driveshafts were embedded in look up tables. Although the stiffness output is a function of torsion generated on the component, the damping torque is set to zero when the stiffness torque is zero. This has been implemented to model the backlash, where the damping forces disappear.

5. COMPARISON OF CONTROLLER PERFORMANCE

As shown at the previous sections applying pedal map based torque request without any driveability corrections results with high amplitude initial kick followed by fading oscillations for tip-in and tip-out manoeuvres. A 2 mass vehicle model based MPC controller had been utilized in order to actively control the engine brake torque in order to have a smooth vehicle acceleration response without shuffles and compromising from response speed. Modifying weight tuning factor in MPC setting defines system response speed. Increasing weight

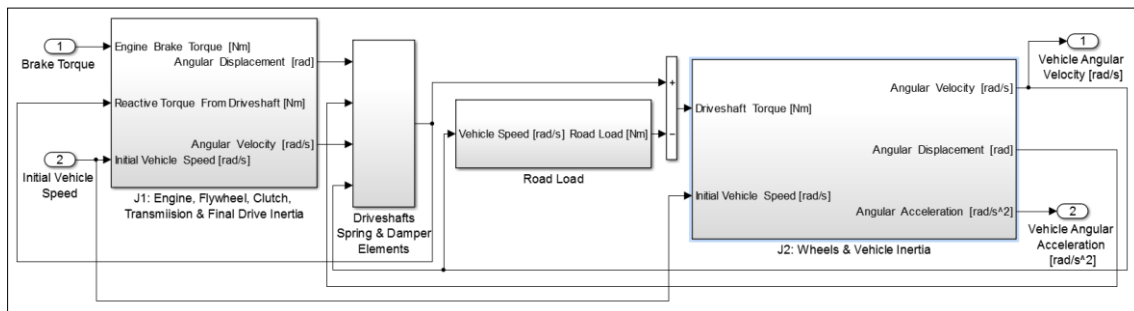


Fig. 13. MATLAB/Simulink 2 mass vehicle model.

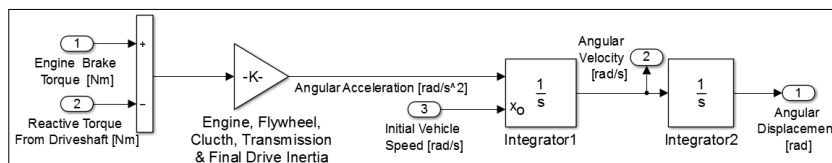


Fig. 14. MATLAB/Simulink J1 inertia block.

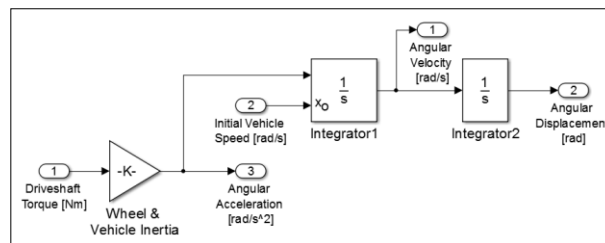


Fig. 15. MATLAB/Simulink J2 inertia block.

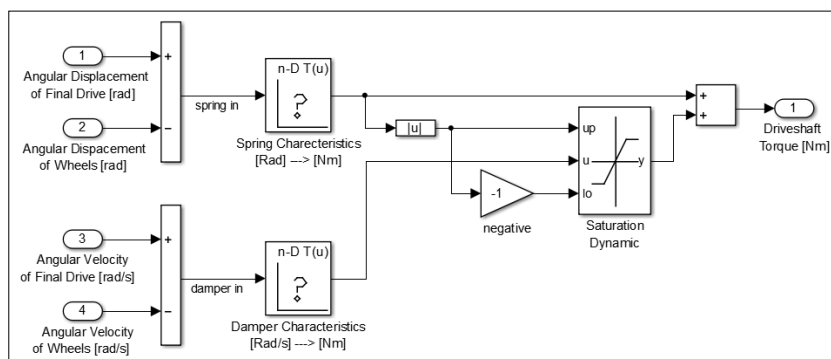


Fig. 16. MATLAB/Simulink driveshafts spring & damper simulation block.

rate results with faster response with a compromise from system robustness forming low frequency oscillations. Introduction of the additional P controller based on engine and vehicle speed difference, assists to further reduce the remaining oscillations without renouncing from system response speed. 3rd gear tip-in and tip-out manoeuvres results are showed at figure 17. Engine and vehicle speed profiles are very similar for the proposed controllers. Zoomed acceleration graphs in figure 18 clearly show that when compared to no controller case both MPC and MPC + P controllers provide smoother vehicle acceleration and deceleration response which will definitely improve comfort characteristics of the vehicle. Additionally system response rate degradation with

respect to no controller case is very small. For both controllers initial response delay is lower than 0.04 seconds. Rise time delay of MPC and MPC + P controllers with respect to no controller case is 0.1 seconds for the tip-in manoeuvre. Similarly rise time delay of MPC and MPC + P controllers with respect to no controller case is 0.1 and 0.2 seconds respectively for the tip-out manoeuvre. Figure 19 shows the torque request from the engine. For both controllers torque rise rate is slightly lower than the no controller case and additional P controller results with %10 less torque request up to 0.5 seconds from the beginning of tip-in and tip-out manoeuvres.

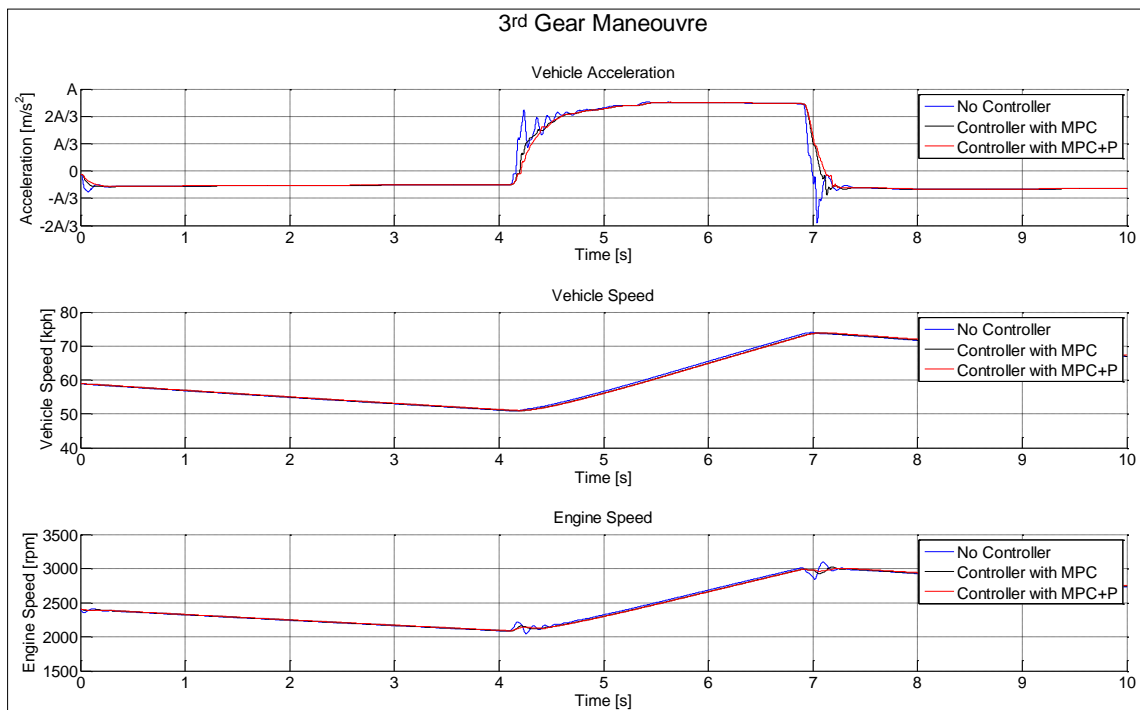


Fig. 17. Comparison of simulation results of no-controller, MPC & MPC + P controller for 3rd gear tip-in and tip-out manoeuvre; Top sub-figure: Vehicle longitudinal acceleration measurement, Mid sub-figure: Vehicle speed, Bottom sub-figure: Engine speed.

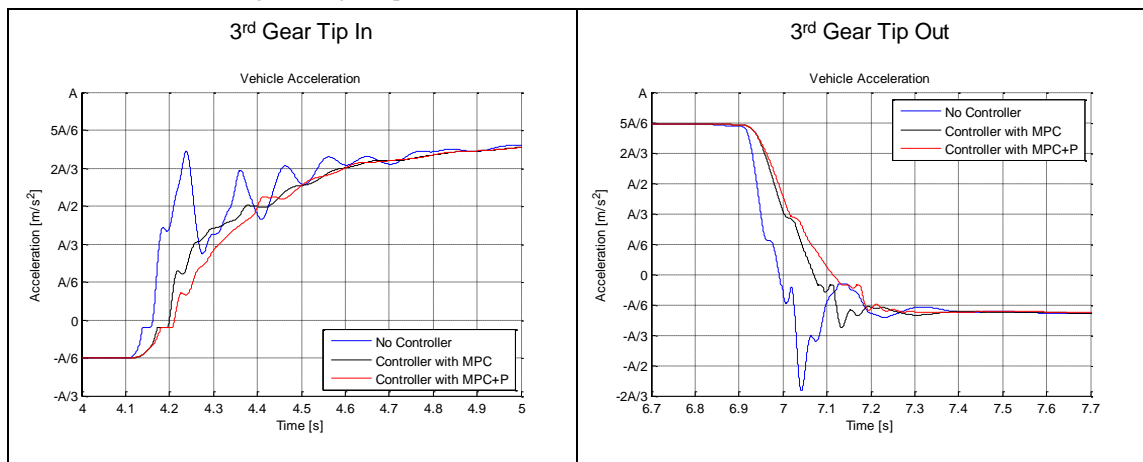


Fig. 18. Comparison of simulation results of no-controller, MPC & MPC + P controller for 3rd gear tip-in (left) and tip-out manoeuvres (right).

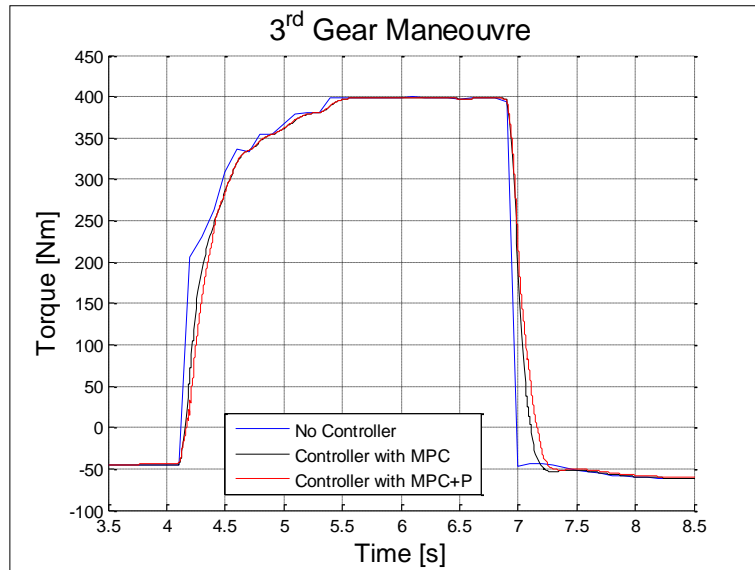


Fig. 19. Comparison of engine torque for simulation results of no-controller, MPC & MPC + P controller for 3rd gear tip-in and tip-out manoeuvre.

4th gear tip-in and tip-out manoeuvres' results are shown at figure 20. Engine and vehicle speed profiles are very similar for the proposed controllers as in the case with 3rd gear manoeuvres. For both controllers initial response delay is lower than 0.04 seconds (Figure 21). Rise time delay of MPC and MPC + P controllers with respect to no controller case is 0.1 seconds for the tip-in manoeuvre. Similarly rise time delay of MPC and MPC + P

controllers with respect to no controller case is 0.15 and 0.2 seconds respectively for the tip-out manoeuvre. Figure 22 shows the torque request from the engine. For both controllers torque rise rate is slightly lower than the no controller case and additional P controller results with %10 less torque results up to 0.3 seconds from the beginning of tip-in and tip-out manoeuvres.

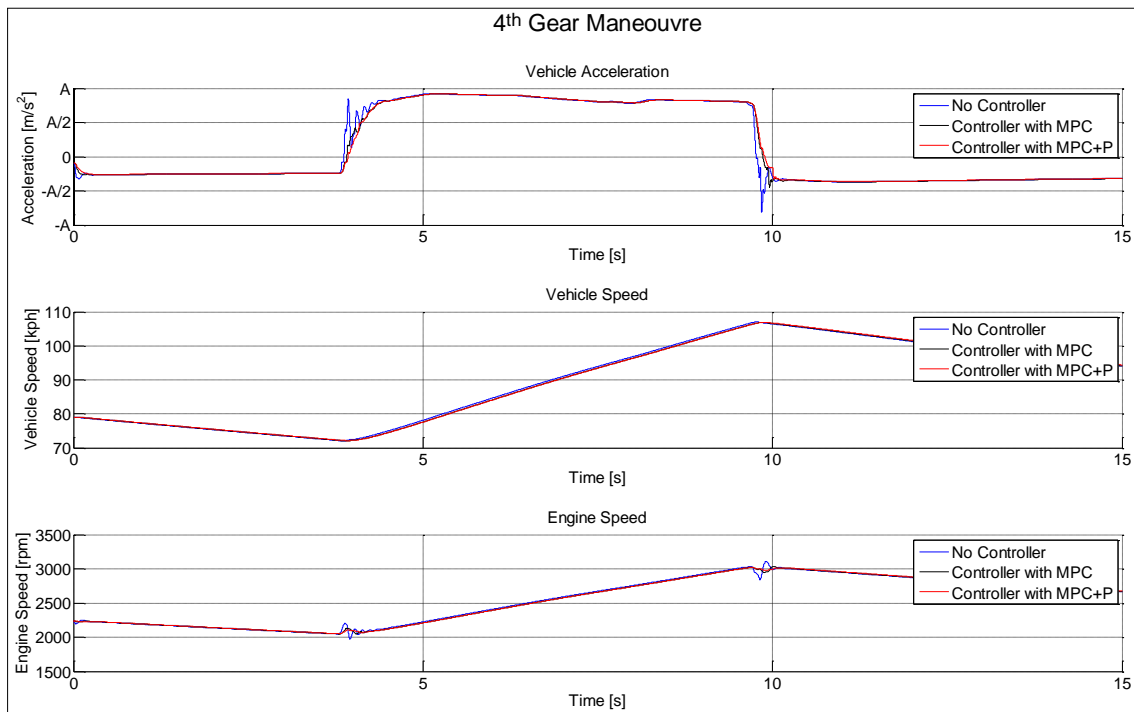


Fig. 20. Comparison of simulation results of no-controller, MPC & MPC + P controller for 4th gear tip-in and tip-out manoeuvre; Top sub-figure: Vehicle longitudinal acceleration measurement, Mid sub-figure: Vehicle speed, Bottom sub-figure: Engine speed.

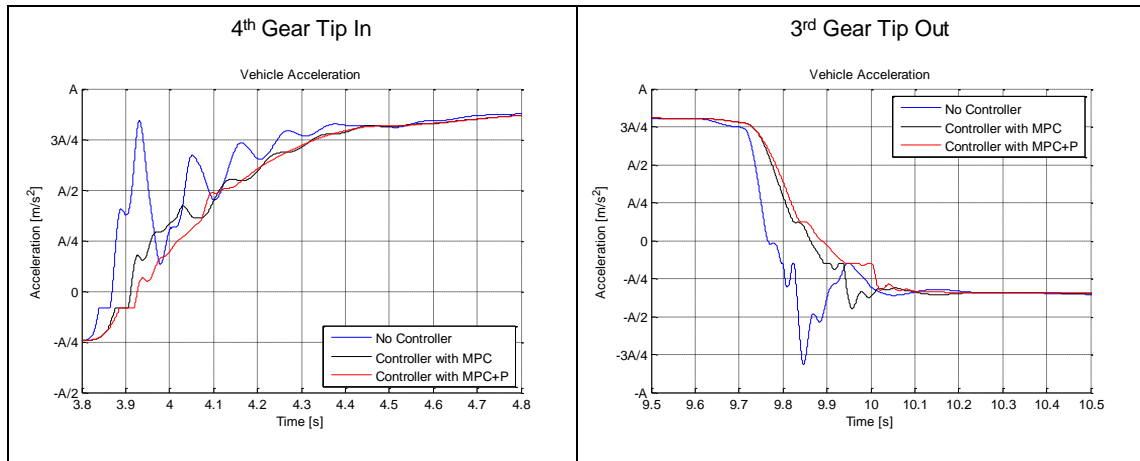


Fig. 21. Comparison of simulation results of no-controller, MPC & MPC + P controller for 4th gear tip-in (left) and tip-out manoeuvres (right).

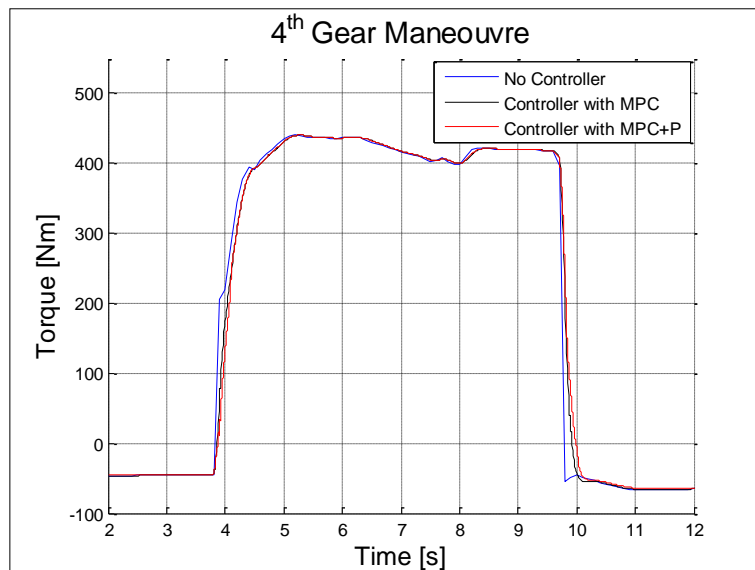


Fig. 22. Comparison of engine torque for simulation results of no-controller, MPC & MPC + P controller for 4th gear tip-in and tip-out manoeuvre.

6. CONCLUSION

This paper describes a torque based MPC algorithm design which contains the behaviour of the driveline with 2 DOF system in the control scheme, to attenuate the powertrain oscillations in longitudinal vehicle motion control. An additional anti-shuffle control element, basically a P controller based on the speed difference of engine and vehicle speeds, has been implemented to the MPC control algorithm to improve the powertrain oscillations without compromising from overall system response speed. It has been demonstrated that employing MPC controller is very effective once the plant of the system has been identified. Weight tuning functionality of the MPC controller provides users the ability to determine system response with robustness and faster system response counter measures. Moreover an additional P control element enables a faster and more smooth/stable response. With the proposed methodology, a calibration engineer will only be required to determine

the MPC controller weight tuning coefficient and P controller gain which results with an easy to calibrate methodology for longitudinal vehicle control.

FUTURE WORK

Proposed algorithm bases on the fact that requested torque will be generated from the internal combustion engine. However in turbocharged diesel engines due to boost lag phenomenon, a difference between requested and produced torque is present. With modern engine air path control algorithms, boost response of the turbocharged engine significantly improved, on the other hand due to elevated torque levels torque reporting deviation is inevitable. Within this scope an engine brake torque estimation model has been developed [13]. Future work of this study will be combining engine brake torque estimation model with the longitudinal vehicle control algorithm.

SYMBOLS

J	: Moment of inertia [kgm ²]
T	: Torque [Nm]
k	: Torsional spring coefficient [Nm/rad]
B	: Torsional damper coefficient [Nm.s/rad]
C_D	: Drag coefficient [-]
F	: Force [Nm]
f_r	: Rolling coefficient [-]
r	: Radius [m]
g	: Gravity [m/s ²]
i	: Gear ratio [-]
m	: Mass [kg]
v	: Velocity [m/s ²]

INDICES

1 :	Equivalent node for engine, flywheel, clutch primary side (4 mass model) Equivalent node for engine, flywheel, clutch primary & secondary sides, final drive (2 mass model)
2 :	Equivalent node for clutch secondary side, transmission, final drive (4 Mass Model) Equivalent node for wheels, tyres and vehicle (2 mass model)
3 :	Equivalent node for wheels and tyres
4 :	Equivalent node for vehicle
e :	Engine
rl :	Road Load
air :	Air
$aero$:	Aerodynamic
rr :	Rolling resistance
g :	Gravitational
fw :	Flywheel
cp :	Clutch primary side
cs :	Clutch secondary side
t :	Reduction ratio of the selected gear
f :	Reduction ratio of the final gear
w :	Wheel
v :	Vehicle
tot :	All driveline components and vehicle

GREEK LETTERS

θ	: Angular position [rad]
$\dot{\theta}$: Angular velocity [rad/s]

$\ddot{\theta}$: Angular acceleration [rad/s ²]
ρ	: Density [kg/m ³]
α	: Road gradient [rad]
σ	: Pacejkatyre model coefficient [Nm/% slip]

REFERENCES

1. De La Salle S., Jansz M. and Light D., "Design of feedback control system for damping of vehicle shuffle", *EAEC conference*, Barcelona, 1-10, (1999).
2. Fredriksson J., Weifors H., and Egardt B., "Powertrain control for active damping of driveline oscillations", *International Journal of Vehicle System Dynamics*, 37(5): 359-376, (2002).
3. Baumann J., Swarnakar A. and Kiencke U., "A robust controller design for anti-jerking", *SAE Technical Paper*, No: 01-0041, (2005).
4. Baumann J., Torkzadeh D., Ramstein A., Kiencke U. and Schlegl, T., "Model-based predictive anti-jerk control", *Control Engineering Practice*, 14: 259-266, (2006).
5. Pettersson M. and Nielsen L., "Diesel engine speed control with handling of driveline resonances", *Control Engineering Practice*, 11: 319-328, (2003).
6. Berriri M., Chevrel P., Lefebvre D., and Yagoubi, M., "Active damping of automotive powertrain oscillations by a partial torque compensator", *American Control Conference*, New York, 5718-5723, (2007).
7. Webersinke L., Augenstein L. and Kiencke, U., "Adaptive linear quadratic control for high dynamical and comfortable behaviour of a Heavy Truck", *SAE Technical Paper*, No: 01-0534, (2008).
8. Templin P. and Egardt, B., "An LQR torque compensator for driveline oscillation damping", *IEEE International Conference on Control Applications*, Saint Petersburg, 352-356, (2009).
9. Templin, P. and Egardt, B., "A powertrain LQT-torque compensator with backlash handling", *Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles*, 66(4): 645-654, (2011).
10. He L., Li L., Yu L., Mao E. and Song, J., "A torque-based nonlinear predictive control approach of automotive powertrain by iterative optimization", *Journal of Automobile Engineering*, 226(8) 1016-1025, (2012).
11. Fang C., Cao Z., Ektesabi M. M., Kapoor A. and Sayem A. H. M., "Model reference control for active drivability improvement", *International Conference on Modelling, Identification and Control*, Melbourne, 202-206, (2014).
12. Pacejka H., B., "Tyre and Vehicle Dynamics", *Butterworth-Heinemann*, 9780080970165, Oxford, (2006).
13. Otkur M., Atabay O. and Ereke M., "In Cylinder Pressure Based Brake Torque Model For Diesel Engines", *International Conference on Automotive & Vehicle Technologies, Istanbul*, 182-191, (2013).

Yenilenebilir Enerji Desteği için Kullanılan Farklı Tip Bataryaların Modellenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi

Yağmur KIRÇIÇEK, Ahmet AKTAŞ, Şule ÖZDEMİR*

Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü
(Geliş/Received : 07.03.2016 ; Kabul/Accepted : 21.04.2016)

ÖZ

Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından (YEK) üretilen enerjinin elektrik güç sistemlerine eklenmesindeki en önemli sorun, bu kaynaklardan üretilen enerjinin iklim koşullarına bağlı olarak genellikle kararsız ve değişken olmasıdır. Güneş enerjisinden, güneş çok iyi parladığında ve bulutsuz bir günde yüksek miktarda elektrik üretilebilmekte ve en önemlisi enerji üretim değerleri iklim koşullarına (güneş parlaklığı) göre sürekli değişmektedir. Enerji depolama uygulamaları, iklim şartlarına göre değişen ve yalnız gündüz çalışabilen güneş enerji sistemleri gibi yenilenebilir enerji sistemlerinden kaynaklanan güç değerlerindeki değişimle başa çıkabilir. Enerji depolama uygulamalarının kullanımı, yükler kaliteli güç sağlanması için mikro şebekelerin kullanılmasıyla zorunlu hale gelmektedir. Bu çalışmada, enerji depolama birimi olan bataryaların modelleme çalışmaları yapılmıştır. Laboratuvar ortamında batarya şarj/deşarj deneyleri yapılarak modelleme çalışmaları için gerekli parametreler elde edilmiştir. Deneysel veriler ile MATLAB/M-File programı kullanılarak gerekli grafikler ve sonuçlar alınmıştır. Bu makalede, deneysel ve modelleme sonuçları karşılaştırılarak modelleme denklemlerinin doğruluk oranlarına yer verilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Kurşun-Asit Batarya, Lifepo₄ Batarya, Batarya Modelleme.

Modelling and Comparative Analysis of Different Type of Batteries Used for Renewable Energy Support

ABSTRACT

The most important problem for providing energy from Renewable Energy Sources (RES) to the electric power system is unstable and variable of the energy generated from these sources by depending on the climatic conditions. When sun is shining and a day without cloud, the more electric power can be produced with solar energy, but the amount of produced electrical energy is fluctuating continuously by depending on the climatic condition and solar irradiation. Energy storage applications can cope with the change in value resulting from the power of renewable energy systems according to climatic conditions and only day that can work as solar energy systems. The use of energy storage application is become compulsory solutions for providing more power quality to the loads by using micro grids. In this study, modelling of batteries that are component of energy storage system has been performed. In the laboratory, battery charge/discharge tests were implemented to obtain the necessary parameters for modelling studies. Graphics and results were obtained with MATLAB/M-File program by using experimental results. Experimental and modelling results compared and the accuracy of the modelling equations is given in this paper.

Keywords: Lead-Acid Battery, LiFePO₄ Battery, Battery Modelling.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji depolama çözümü olarak birçok depolama alternatifini bulunmaktadır. Özellikle bataryalar, teknolojinin de gelişmesiyle birlikte enerji depolama birimi olarak vazgeçilmezler arasında yerini almaktadır. Çeşitli kimyasal yapıya sahip birçok batarya çeşidi geliştirilmektedir. Günümüzde çok yaygın olarak kullanılan kurşun-asit bataryalar ve yeni teknolojiye sahip olan lityum-iyon bataryaların kullanımı oldukça yaygındır. Lityum-iyon bataryalar, kurşun-asit bataryalara göre daha yüksek enerji yoğunluğuna sahiptirler. Ayrıca kurşun asit bataryalar ile karşılaştırıldığında lityum-iyon bataryalar, daha az hacim ve ağırlıkta daha fazla enerji depolamaktadırlar [1-9]. Bu çalışmada kurşun-asit ve lityum demir fosfat batarya tipleri incelenmiştir.

Batarya modelleme üç temel grupta sınıflandırılabilir.

Bunlar; fiziksel veya kimyasal, matematiksel ve elektriksel modelleme yöntemleridir. Herhangi bir elektriksel değer olmadan elde edilen matematiksel batarya modelleri; enerji verimliliği ve kapasitesi gibi performans belirteçlerini tahminde sınırlıdır. Bataryalar için elektriksel modeller, kaynaklar ve direnç ve kapasitör gibi pasif elemanlardan oluşur [10]. Literatürde batarya modelleme ile ilgili bir çok çalışma bulunmaktadır. Chen ve arkadaşları [11] lityum iyon bataryalar için Thevenin modelin geçici kapasitesini ve empedans tabanlı modelin özelliklerini birleştiren bir model üzerinde çalışmışlardır. Rakhmatov ve arkadaşları [12], bir cep bilgisayarındaki uygulamalar için batarya ömrü analizi için bir model önermektedirler.

Bu çalışmada, gerilim kaynağı ve dirençten meydana gelen basit elektriksel batarya modeli kullanılmaktadır. Bataryanın doğru şekilde modellenmesi ve parametrelerinin düşük hata oranları ile belirlenerek

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: sozaslan@kocaeli.edu.tr

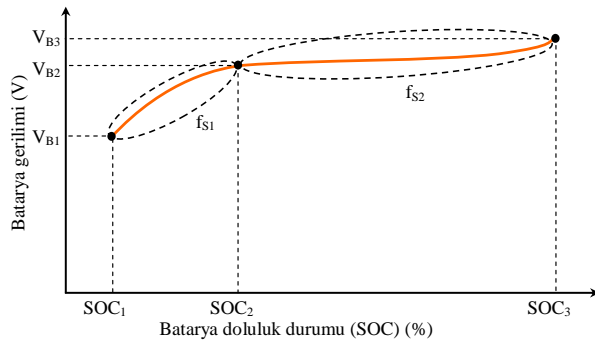
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 83-90

kontrolünün yapılması, hem bataryanın ömrünü uzatır hem de güvenli olarak çalışmalarını sağlanmış olur. Bu çalışmanın amacı, farklı tipteki bataryaları modelleyerek en düşük hata oranlarıyla batarya parametrelerini belirlemektir.

2. BATARYA MODELLEME ÇALIŞMALARI (BATTERY MODELLING STUDIES)

2.1. Bataryanın Şarj Durumunda Modellenmesi (Modelling of Battery in Charging Mode)

Batarya şarj modelleme çalışmalarında Şekil 1'de verilen örnek batarya şarj eğrisi kullanılmıştır. Bu eğride örnek bir bataryanın şarj durumunda terminal uçlarındaki gerilimin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan bütün bataryaların şarj eğrileri temel yapı itibarıyla bu eğri tipindedir. Bu nedenle böyle bir eğrinin model denkleminin çıkarılması, bu çalışmadaki şarj modelleme çalışmalarının temelini oluşturmaktadır. Örnek şarj grafiğinde verildiği gibi eğri modellenirken f_{S1} ve f_{S2} fonksiyonu olarak iki parçaya ayrılmaktadır.



Şekil 1. Örnek bir batarya şarj gerilimi doluluk durumu grafiği (Charge voltage-SOC graph for sample battery)

Şekil 1'de verilen örnek bir batarya şarj eğrisinde modelleme denklemini oluştururken daha basite indirgeyerek doğruluğunu arttırmak için iki ayrı fonksiyon olarak tanımlanmaktadır. Bu fonksiyonlar f_{S1} ve f_{S2} olarak temsil edilmektedir. Denklem (1)'deki m_1 , f_{S1} fonksiyonunun eğimini, Denklem (2)'deki m_2 , f_{S2} fonksiyonunun eğimini belirlemektedir.

$$m_1 = \frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \quad (1)$$

$$m_2 = \frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \quad (2)$$

Batarya şarj deneylerinde aynı batarya tipleri farklı akım değerlerinde testlere tabi tutulmaktadır. Farklı akım değerlerinde bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değeri bataryanın doluluk durumuna (SOC) göre farklılık göstermektedir. Bu grafiklerdeki farklılık aslında Denklem (1) ve Denklem (2)'te verilen m_1 ve m_2 değerlerindeki değişikliktir. Böylece bataryanın şarj akımı değişmesi durumunda deneysel sonuçlardan alınan veriler doğrultusunda aynı denklem yapısı ile farklı akımlardaki batarya

doluluk durum değişimi tahmini yapılabilir.

Denklem (3) ve Denklem (4)'te f_{S1} ve f_{S2} denklemleri verilmektedir. Batarya şarj modellemesinde bulunan f_{S1} ve f_{S2} denklemleri bir bütün olarak ifade edilerek toplam şarj grafiği oluşturulmaktadır. Bu toplam şarj grafiğinin formülü f_{S1} ve f_{S2} denklemleri kullanılarak Denklem (5)'teki gibi ifade edilmektedir. Böylelikle batarya şarj eğrisinin grafiği tek bir temel matematiksel formül ile ifade edilebilir.

$$f_{S1} = V_{B0} + \left[\frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \right] \cdot SOC \quad (3)$$

$$f_{S2} = V_{B02} + \left[\frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \cdot SOC \quad (4)$$

Denklem (3) ve Denklem (4)'de verilen V_{B0} f_{S1} fonksiyonundaki başlangıç anındaki batarya terminal gerilimi, V_{B02} f_{S2} fonksiyonundaki başlangıç anındaki batarya terminal gerilimi, V_{B1} , V_{B2} ve V_{B3} fonksiyonları tanımlarken alınan batarya gerilim ara değerleri, SOC % cinsinden batarya doluluk durum oranı, SOC_1 , SOC_2 ve SOC_3 % cinsinden fonksiyonları tanımlarken alınan batarya doluluk durum oranının ara değerleridir.

$$V_{MBS} = (f_{S1} - f_{S2}) \cdot e^{-5 \left[\frac{SOC}{SOC_3} \right]} + f_{S2} \quad (5)$$

Denklem (5)'teki V_{MBS} batarya şarj eğrisinin fonksiyonu, f_{S1} ilk eğri f_{S2} ikinci durumdaki eğri fonksiyonlarıdır. Bu denklemde ilk bölümde bulunan f_{S1} ve f_{S2} fonksiyonlarının farkı eksponansiyel bir katsayı ile çarpılmaktadır. Buradaki e^{-5} değeri sıfıra yakın bir değer olduğu için bu katsayı seçilmektedir. f_{S1} ve f_{S2} fonksiyonlarının büküm noktasına en yakın değeri e^{-5} katsayısı verdiği için bu değer -5 seçilmiştir. Denklemde ilk olarak SOC_1 başlangıç değerleri için f_{S1} fonksiyonun çizdirilmesi sağlanacak daha sonra SOC_3 değerine gelindiğinde e^{-5} değeri sıfıra yaklaşacaktır. Böylece denklemde sadece f_{S2} fonksiyonu kalacak eğri çizimi tamamlanacaktır.

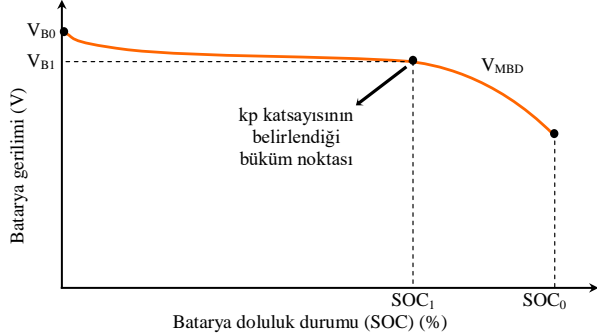
Bataryanın şarj gerilim değeri ve batarya doluluk durumuna göre değişimi Denklem (6) formülü ile elde edilmektedir. Batarya şarj modelleme çalışmalarında hesaplanan bataryanın gerilimi V_{MBS} ile temsil edilmektedir. Batarya şarj modelleme çalışmalarında elde edilen V_{MBS} gerilim matris ile deneysel sonuçlardan alınan değerler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırılması yapılmaktadır.

$$V_{MBS} = \left[V_{B0} + \left[\frac{V_{B2} - V_{B1}}{SOC_2 - SOC_1} \right] \cdot SOC - V_{B02} + \left[\frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \right] \cdot e^{-5 \left[\frac{SOC}{SOC_3} \right]} + V_{B02} + \left[\frac{V_{B3} - V_{B2}}{SOC_3 - SOC_2} \right] \cdot SOC \quad (6)$$

2.2. Bataryanın Deşarj Durumunda Modellenmesi (Modelling of Battery in Discharge Mode)

Batarya deşarj modelleme çalışmalarında Şekil 2'de verilen örnek bir bataryanın deşarj durumunda terminal uçlarındaki gerilimin batarya doluluk durumuna göre değişimi verilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan bütün bataryaların deşarj eğrileri temel yapı itibarıyla bu

eğri tipinde çıkmaktadır. Bu yüzden böyle bir eğrinin model denkleminin çıkartılması şarj modelleme çalışmalarında olduğu gibi bütün deşarj modelleme çalışmalarının temelini oluşturacaktır. Deşarj gerilimi değişimi Şekil 2'deki grafikte verildiği gibi tek bir fonksiyon ile tanımlanabilmektedir.



Şekil 2. Örnek bir batarya deşarj gerilimi - doluluk durumu grafiği (Discharge voltage-SOC graph for sample battery)

Batarya deşarj modelleme için kullanılan f_D fonksiyonu Denklem (7)'de verilmektedir.

$$V_{MBD} = V_{B0} - V_{B0} \cdot e^{kp \left(\frac{SOC}{SOC_0} - 1 \right)} + V_{B0} \cdot e^{-kp} \quad (7)$$

Denklem (7)'deki V_{B0} , deşarj eğrisinin batarya terminal uçlarındaki gerilimin başlangıç noktasıdır, SOC % cinsinden batarya doluluk durum oranı, SOC_0 % cinsinden fonksiyonu tanımlarken alınan son değeri, kp değeri batarya deşarj eğrisinin SOC_1 ve V_{B1} noktalarının kesişimi olan eğrinin bükülme açısını belirleyen parametredir. Batarya deşarj modelleme çalışmalarında hesaplanan bataryanın gerilimi V_{MBD} ile temsil edilmektedir. Batarya deşarj modelleme çalışmalarında elde edilen V_{MBD} gerilim denklemleri ile deneysel sonuçlardan alınan değerler aynı grafik üzerinde çizdirilerek karşılaştırılması yapılmaktadır.

Denklem (7)'de, SOC değeri maksimum olduğunda, yani SOC değerinin SOC_0 'a eşit olduğu durumda eksponansiyelin üzeri sıfıra eşit olur. Bu durumda, fonksiyonda sadece V_{B0} eksponansiyel katsayılı $-kp$ değeri kalır. Bu değer de eğrinin başlangıç konumu olan V_{B0} noktasını işaret etmektedir. Daha sonra SOC'nin zamanla değişen değerlerine bağlı olarak batarya deşarj eğrisi aşağıya doğru inerek SOC_0 değerine gelmektedir.

Batarya şarj deneylerinde olduğu gibi deşarj deneylerinde de aynı batarya tipleri farklı akım değerlerinde testlere tabi tutulmaktadır. Farklı deşarj akım değerlerinde bataryanın terminal uçlarındaki gerilim değeri bataryanın doluluk durumuna göre farklılık göstermektedir. Yani batarya deşarj eğrisinin SOC_0 değeri küçülmektedir. Bu grafiklerdeki farklılık aslında Denklem (7)'de verilen SOC_0 değerinin ve kp katsayısının değişimidir. Farklı deşarj değerlerinden elde edilen sonuçlar ile bu SOC_0 ve kp katsayıları belirlenmektedir. Böylece bataryanın deşarj akımı değişmesi durumunda deneysel sonuçlardan alınan veriler doğrultusunda aynı denklem yapısı ile farklı

akımlardaki batarya doluluk durum değişimi tahmini yapılabilmektedir. Batarya deşarj modelleme çalışma sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak modellenen denklemlerin % hata oran sonuçları verilmektedir.

Batarya şarj ve deşarj deneylerinde alınan veriler ile modellemeye hesaplanarak çizdirilen grafiklerin hata oran miktarları Denklem (8)'te verilen formül ile belirlenmektedir.

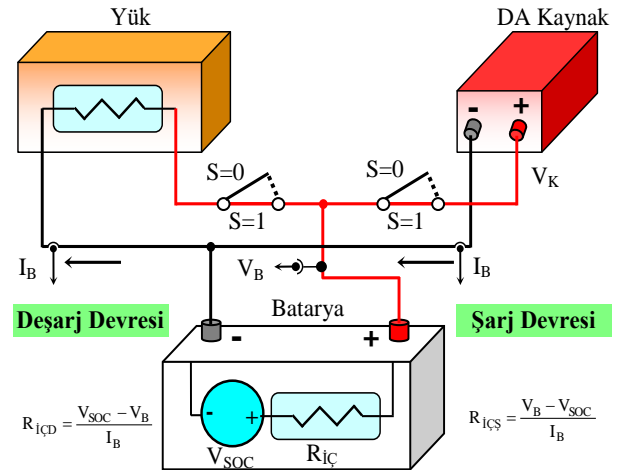
$$h_B = \left(\frac{V_B - V_{MB}}{V_B} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Denklem (8)'teki h_B modelleme sonucundaki karşılaştırma hata oranı, V_B batarya terminal gerilimi, V_{MB} modelleme sonucunda hesaplanan batarya terminal gerilim değeridir. Bu gerilim değeri şarj modelleme değeri için V_{MBS} deşarj modelleme değeri için V_{MBD} alınmaktadır [13].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Batarya, kimyasal iç yapısından dolayı şarj ve deşarj olurken batarya terminal uçlarındaki gerilim bağlı olduğu duruma göre değişkenlik gösterir. Örneğin batarya şarj olurken bağlı olduğu kaynak gerilim değeri terminal uçlarındaki gerilime eşittir. Fakat bataryaya bağlanan kaynak uçlarındaki terminal uçları çıkarılırsa, bataryanın geriliminde belli bir süre sonra küçük de olsa bir düşüş meydana gelir. Aynı şekilde batarya deşarj esnasında okunan gerilim değeri yük bağlı olmadığı durumdakine göre daha küçüktür. Bu durum batarya difüzyon modeli ile açıklanır [14].

Şekil 3'te batarya şarj ve deşarj deneylerinin, deney sırasında alınan ölçüm noktaları ve devre şeması verilmektedir.



Şekil 3. Batarya şarj/deşarj deneyi devre şekli ve ölçüm noktaları (Battery charge/discharge test circuit diagram and measurement points)

Batarya difüzyon model davranışını da dikkate alarak batarya modelleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu modelleme çalışmaları esnasında bataryalar şarj ve deşarj

edildi. Batarya şarj olurken kaynak gerilimi ve akımı ölçüldü. Bu akım ve gerilim değerleriyle bataryanın dinamik iç direnci hesaplandı. Daha sonra kaynak bağlantısı kesilerek bataryanın hücrelerinin dinlenmesi yani toparlanması (recovery) beklendikten sonra bataryanın uçlarındaki gerilim ölçüldü. Ölçülen bu batarya gerilimi bataryanın doluluk durumu hakkında bilgi vermektedir ve bu gerilim seviyesi doluluk oranı ile orantılıdır. Batarya deşarj sırasında ise yük bağlı iken akım ve gerilim değerleri ölçüldü. Bu akım ve gerilim değerleri bataryanın dinamik iç direnci hakkında bilgi vermektedir. Daha sonra şarj esnasında olduğu gibi deşarj sırasında yük batarya uçlarından ayrılmaktadır. Bataryanın tekrar toparlanma süreci beklenmektedir. Bu süre 15-30 saniye arasında olmaktadır. Çünkü bu sürelerden sonra batarya gerilim seviyesi sabit kalmaktadır. Batarya terminal uçları boşa iken bataryanın gerilim seviyesi ölçülerek kayıt edilmektedir. Bu gerilim seviyesi bataryanın doluluk durumunun hesaplanmasını sağlamaktadır. Şekil 4'te deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların fotoğrafı verilmektedir.



Şekil 3. Deneysel çalışmalarda kullanılan bataryaların fotoğrafı (Photograph of the batteries used in experimental studies)

Bu çalışma kapsamında bataryaların şarj sonuçlarını aldıktan sonra batarya dinamik iç direncini hesaplamak için Denklem (9) kullanılmaktadır. Batarya gerilimi şarj

durumunda iken batarya tamamen dolu duruma gelene kadar kaynak geriliminden düşüktür.

$$R_{i\text{ÇŞ}} = \frac{V_B - V_{\text{SOC}}}{I_B} \quad (9)$$

Batarya deşarj durumunda iken yüke bağlı olduğu durumda terminal uçlarındaki gerilim değeri bir önceki değere göre bir miktar düşecektir. Deşarj durumunda iken bataryanın dinamik iç direnci Denklem (10)'daki gibi hesaplanmaktadır.

$$R_{i\text{ÇD}} = \frac{V_{\text{SOC}} - V_B}{I_B} \quad (10)$$

Denklem (9) ve Denklem (10)'daki V_B bataryanın terminal uçlarındaki gerilim, V_{SOC} batarya ile seri bağlı olarak temsil edilen bataryanın doluluk durumu ile bağlantılı olan bataryanın iç kaynak gerilimi, I_B şarj ve deşarj sırasındaki batarya akımı, $R_{i\text{ÇŞ}}$ bataryanın şarj durumunda dinamik iç direncini, $R_{i\text{ÇD}}$ bataryanın deşarj durumunda dinamik iç direncini temsil etmektedir.

3.1. Batarya Deneysel Çalışmaların Özeti (Summary of Battery Experimental Studies)

Bu çalışmada yapılan üç farklı batarya şarj ve deşarj deneysel çalışma sonuçlarının özeti bu bölümde verilmektedir. Her bir bataryanın gerilimi, Ah cinsinden toplam kapasitesi, şarj ve deşarj akımları, şarj ve deşarj C oranları, bataryaya verilen ve bataryadan alınan Ah cinsinden kapasite miktarları, şarj ve deşarj deney süreleri ve ölçüm periyot aralıkları Çizelge 1'de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Bu Çizelge ile bataryalara verilen ve bataryalardan çekilen akım değerleri, kapasite miktarları incelenebilmektedir. Bu çalışmada batarya şarj ve deşarj deney sonuçlarında, batarya katalog bilgilerinde verilen standart şarj ve deşarj akımlarında üzerinde yazılan toplam kapasite miktarını tam olarak verebildiği gözlenmiştir.

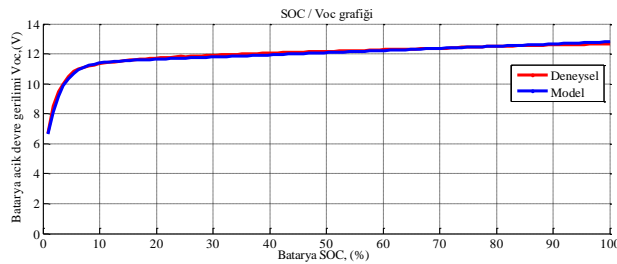
Çizelge 1. Batarya şarj ve deşarj deney sonuçlarının Çizelgesi (Table of battery charge and discharge experimental test results)

Batarya tipi	Deney akımı (A)	Toplam kapasite (Ah)	Deney süresi (dk)	Ölçüm periyodu (dk)	C oranı (C)	Verilen/Alınan kapasite (Ah)	Yük (Ω)
Hyundai Marka (Kurşun Asit)							
Şarj	1	7,2	330	3	0,13	5,5	
Deşarj	1	7,2	294	3	0,13	4,9	12
	3	7,2	86	2	0,41	4,29	4
Vision Marka (Kurşun Asit)							
Şarj	Sabit 4,4	80	1050	15	0,055	77	
Deşarj	Sabit 4,4	80	1040	20	0,055	76,12	<2,72
	Sabit 10	80	225	12,5	0,125	37,5	<1,2
Hipower Marka (LiFePO₄)							
Deşarj	15,6	100	27	3	0,156	7,02	0,205
	32,5	100	21	3	0,325	11,375	0,098
	40,1	100	12	2	0,401	0,82	0,065

Fakat batarya deşarj akım miktarı arttığında, batarya üzerinde yazan toplam kapasiteden daha az miktarda bir kapasitede enerji vermektedir. Bir batarya aynı akımda şarj ve deşarj edildiğinde toplam şarj süresinin toplam deşarj süresinden uzun olduğu gözlenmiştir.

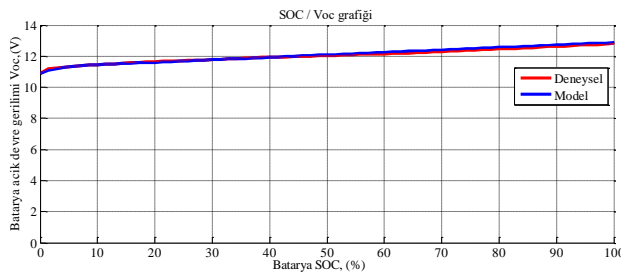
4. BATARYA ŞARJI DENEYSSEL VE MODELLEME KARŞILAŞTIRMALARI (EXPERIMENTAL AND MODELLING COMPARISON OF BATTERY CHARGING)

Şekil 5'te deneysel çalışmalarda kullanılan Hyundai marka 12V 7,2Ah kurşun-asit bataryanın 1A şarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir. Batarya 1A şarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (6)'da verilen formül ile çizdirilmektedir. Modelleme ve deneysel çalışmalar sonucundaki veriler kullanılarak Matlab/M-file arayüzü ile çizdirilen grafikler karşılaştırılmaktadır. Batarya 1A şarj modelleme çalışmaları deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında çok yakın tahmin değerleri elde edildiği görülmektedir. Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (8) kullanılarak hata oranı maksimum %4,3 olarak hesaplanmaktadır. Bu hata oranı sonucu modelleme çalışmalarının deneysel sonuçlara çok yakın ve kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 4. Hyundai 12V 1A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hyundai 12V 1A battery charging experimental and modelling comparison)

Şekil 6'da deneysel çalışmalarda kullanılan Vision marka 12V 80Ah kurşun-asit bataryanın şarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir. Batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (6)'da verilen formül ile çizdirilmektedir.



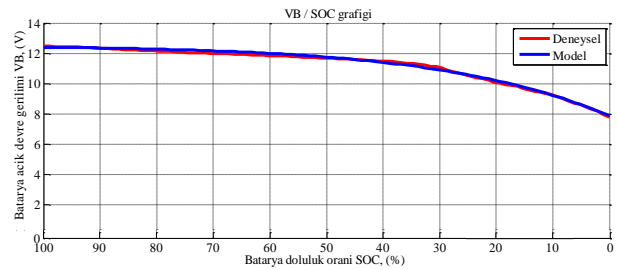
Şekil 5. Vision 12V sabit 4,4A şarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Vision 12V constant 4,4A battery charging experimental and modelling comparison)

Vision marka 12V batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmaları sonucunda 1A şarj modelleme çalışmasında kullanılan Denklem (8) ile hata oranı maksimum %0,9 olarak hesaplanmaktadır. Bu hata oranları, modelleme çalışmalarının deneysel sonuçlara çok yakın ve kararlı olduğunu göstermektedir.

Batarya şarj modelleme çalışmalarında elde edilen denklemin her iki batarya için düşük hata oranıyla sonuç verdiği anlaşılmaktadır.

5. BATARYA DEŞARJI DENEYSSEL VE MODELLEME KARŞILAŞTIRMALARI (MODELLING AND EXPERIMENTAL COMPARISON OF BATTERY DISCHARGE)

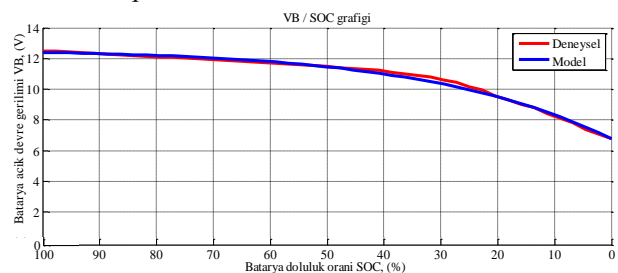
Şekil 7 ve Şekil 8'de deneysel çalışmalarda kullanılan Hyundai marka 12V 7,2Ah kurşun-asit bataryanın sırasıyla sabit yük 1A ve 3A deşarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir.



Şekil 6. Hyundai 12V 1A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hyundai 12V 1A battery discharging experimental and modelling comparison)

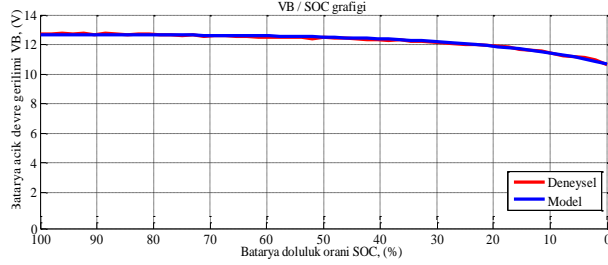
Batarya 1A ve 3A deşarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (7)'de verilen formül ile çizdirilmektedir.

Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (8) kullanılarak hata oranı maksimum %4,1 olarak hesaplanmaktadır. Şekil 8'de Hyundai marka kurşun-asit bataryanın 3A deşarj deneysel ve modelleme çalışmalarının karşılaştırılması verilmektedir. Batarya 3A deşarj modelleme çalışmasında batarya doluluk durumuna bağlı olarak batarya terminal uçlarındaki gerilim değişimi Denklem (7)'de verilen formül ile çizdirilmektedir. Hyundai marka 12V batarya 1A şarj modelleme çalışmaları sonucunda Denklem (8) kullanılarak hata oranı maksimum %8,6 olarak hesaplanmaktadır.



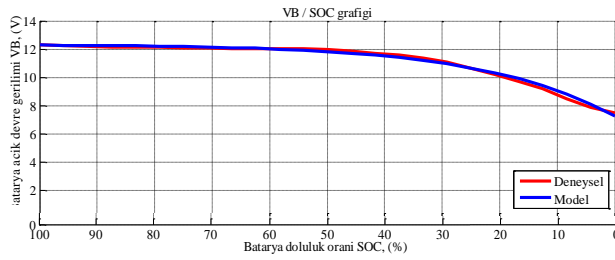
Şekil 7. Hyundai 12V 3A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hyundai 12V 3A battery discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 9'da Vision 12V bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit 4.4A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 9'da verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,18 olarak hesaplanmaktadır.



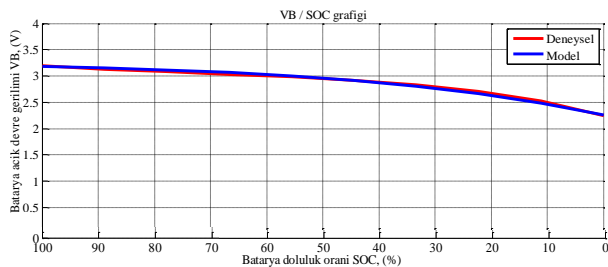
Şekil 8. Vision 12V sabit 4,4A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Vision 12V constant 4,4A discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 10'da aynı Vision 12V batarya tipinin sabit 10A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları verilmektedir. Şekil 10'da verilen deneysel ve modelleme karşılaştırma sonucunda maksimum %3,6'lık hata oranı ile başarılı bir modelleme çalışması yapıldığı görülmektedir.



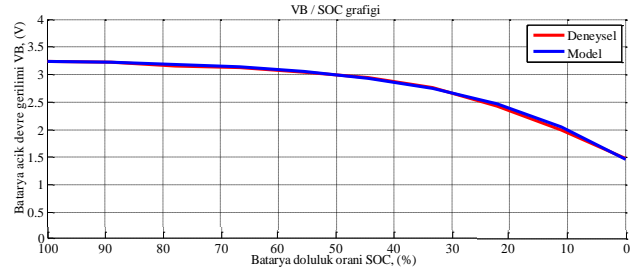
Şekil 9. Vision 12V sabit 10A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Vision 12V constant 10A discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 11'de Hipower marka 3,2V 100Ah kapasiteye sahip LiFePO₄ bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 15,6A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Bir önceki deşarj modelleme çalışmalarında olduğu gibi Denklem (7)'de verilen formül kullanılmaktadır. Şekil 11'de verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,17 olarak hesaplanmaktadır.



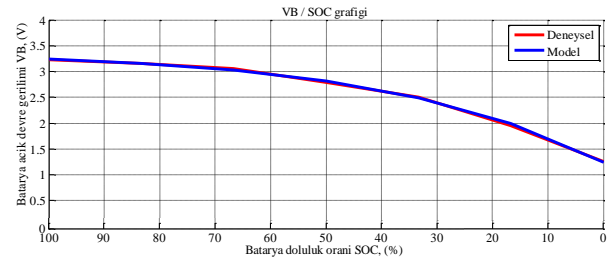
Şekil 10. Hipower 3,2V 15,6A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hipower 3,2V 15,6A discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 12'de Hipower marka LiFePO₄ bataryanın terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 32,5A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 12'de verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,39 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 12. Hipower 3,2V 32,5A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hipower 3,2V 32,5A discharger experimental and modelling comparison)

Şekil 13'te aynı Hipower marka batarya için son deney çalışması olan terminal gerilim değerine bağlı olarak doluluk bilgisinin verildiği sabit yük 49,1A deşarj deneysel ve modelleme çalışmaları görülmektedir. Şekil 13'te verilen deneysel ve model karşılaştırmaları çok düşük hata oranı ile tespit edilmekte ve maksimum hata oranı %1,93 olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 13. Hipower 3,2V 49,1A deşarj deneysel ve modelleme karşılaştırması (Hipower 3,2V 49,1A discharger experimental and modelling comparison)

Bu çalışmada batarya şarj/deşarj deneyleri sonuçları alınarak, elde edilen modelleme çalışmaları ile batarya doluluk durum tahmini yapılmaktadır. Çizelge 2'de deneysel ölçümler ile modelleme denklem sonuçlarının karşılaştırma sonucunda hata oran miktarları verilmektedir. Önerilen modelleme denklemleri batarya için farklı şarj/deşarj deneyleriyle kıyaslama imkânı sağlamaktadır. Farklı akım değerlerindeki batarya şarj/deşarj modelleme çalışmaları yapılarak denklemlerin doğruluğu kıyaslanmıştır ve kabul edilebilir hata oranlarına sahip bir matematiksel denklem oluşturulmuştur.

Batarya şarj işlemlerinde bataryanın boş olduğu durumda dinamik iç direncinin çok yüksek olduğu şarj oldukça batarya dinamik iç direncinin düştüğü gözlenmektedir. Hyundai marka batarya için bu dinamik iç direnç değeri 0,29Ω-8,23Ω arasında bir değerdedir. Aynı batarya deşarj işlemleri sırasında dinamik iç direncinin 0,29Ω-8,23Ω arasında olduğu gözlenmiştir. Vision marka

bataryada dinamik iç direnç değeri şarj deneylerinde $0,152\Omega-0,065\Omega$, deşarj işlemlerinde $0,025\Omega-0,536\Omega$ olarak hesaplanmıştır. LiFePO₄ batarya deşarj deneyinde batarya dinamik iç direnci $0,0016\Omega-0,1143\Omega$ olarak bulunmuştur. Özellikle batarya deşarj deneylerinde katalog bilgilerinde yer alan 20Hr ifadesi yani bataryanın 0,05C oranında ve 0,036A ile deşarj edildiğinde 20 saat enerji verebildiği, bu akım değerinin üzerine çıktığında Peukart eğrisinin de açıkladığı gibi batarya toplam

yöntemi ile elde edilmektedir. Şarj modelleme çalışmalarında elde edilen model denklemi ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Hyundai marka batarya 1A şarj modelleme çalışmasında maksimum %4,3 ve Vision marka batarya sabit 4,4A şarj modelleme çalışmasında maksimum %0,9 hata oranları ile sonuçlandırılmıştır. Aynı şekilde deşarj modelleme çalışmalarında deşarj denklemi oluşturulmuştur. Oluşturulan bu deşarj modeli ile deneysel sonuç

Çizelge 2. Modelleme çalışma sonucundaki hata oranları (Error rates in the modelling study results)

Şarj Modelleme Çalışmaları Hata Oranları							
Batarya	Hyundai 1A			Vision basit 4,4A			
Hata (%)	4,3			0,9			
Deşarj Modelleme Çalışmaları Hata Oranları							
Batarya	Hyundai 1A	Hyundai 3A	Vision Sabit 4,4A	Vision Sabit 10A	Hipower 15,6A	Hipower 32,5A	Hipower 49,1A
Hata (%)	4,1	8,6	1,18	3,6	1,17	1,39	1,93

kapasitesinin çok altında bir verdiği gözlenmiştir. Batarya sabit deşarj akımında yapılan deneylerde, aynı başlangıç akımındaki sabit yük deşarj deneylerine göre bataryanın doluluk durumunun daha çabuk bittiği gözlenmektedir. Hyundai marka kurşun-asit bataryada 3A deşarj için sabit yük altında 86dk iken, sabit deşarj akım deneyinde bu süre 38dk olarak hesaplanmıştır. Bunun da sebebi batarya hücrelerinin sabit akım değerinde daha çok zorlanmasıdır. Bu yüzden toplam kapasite miktarı düşmektedir. Bir bataryanın terminal uçlarına yük bağlandığında deşarj sırasında terminal uçlarındaki gerilimi düşmektedir. Yük miktarı arttıkça bataryanın gerilim düşüşündeki miktar daha da artmaktadır. Bu nedenle oluşturulan batarya modelindeki V_{MB} değerinin deneysel sonuç değerlerinden bir miktar daha küçük olduğu gözlenmiştir. Bu farktan dolayı deşarj akımı arttıkça batarya deşarj modelleme çalışmalarındaki hata oranı çok küçük bir miktar artmaktadır.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada bataryalar ile farklı akım ve gerilim değerlerinde şarj ve deşarj deneyleri yapılmıştır. Bataryayı şarj ve deşarj ederken sabit gerilim ile şarj, sabit akım ile şarj, sabit yük ile deşarj ve sabit akım ile deşarj deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda yapılan şarj deneylerinde bataryayı şarj ederken özellikle bataryaya uygulanan gerilim değerinin batarya sağlığı açısından önemli olduğu gözlenmiştir. Eğer batarya katalog bilgilerinde verilen şarj etme gerilim değerini aşarsa, bataryanın hücre aralarındaki uzaklığın fiziksel olarak arttığı gözlenmiştir. Bu deneyler doğrultusunda batarya şarj ve deşarj modelleme çalışmalarında toplam kapasite değişimi belirlenerek parametreler elde edilmiştir. Belirlenen parametreler doğrultusunda bataryanın şarj ve deşarj modelleri çıkartılmaktadır. Bu modelleme çalışmaları eğri uydurma “curve fitting”

karşılaştırılmıştır ve bu modellemelerde Hyundai marka 1A deşarj deneyinde maksimum %4,1’lik hata oranı çıktığı gözlenmiştir. İleriki çalışmalarda özellikle LiFePO₄ batarya şarj deneyleri sırasında yüksek akım değerlerinde kontrollü akım kaynağı kullanılarak daha fazla sayıda deneysel sonuçlar alınabilir. Aynı şarj modelleme denklemlerinin bu deney sonuçlarına uygulanmasıyla düşük hata oranları ile yaklaşım gerçekleştirileceği öngörülmektedir.

SEMBOLLER (NOTATIONS)

f_{S1}	:1. şarj model fonksiyonu
f_{S2}	:2. şarj model fonksiyonu
h_B	:hata oranı
k_p	:deşarj eğri katsayısı
m_1	: f_{S1} fonksiyonun eğimi
m_2	: f_{S2} fonksiyonun eğimi
R_{iCD}	:batarya deşarj dinamik iç direnci, [Ω]
$R_{iÇŞ}$:batarya şarj dinamik iç direnci, [Ω]
SOC	:batarya doluluk durumu, [%]
V_B	:batarya terminal gerilimi, [V]
V_{B0}	: f_{S1} başlangıç anındaki batarya gerilimi, [V]
V_{B02}	: f_{S2} başlangıç anındaki batarya gerilimi, [V]
V_{B1}	:1. batarya gerilim ara değerleri, [V]
V_{B2}	:2. batarya gerilim ara değerleri, [V]
V_{B3}	:3. batarya gerilim ara değerleri, [V]
V_{MBD}	:batarya deşarj model gerilimi, [V]
V_{MBS}	:batarya şarj model gerilimi, [V]

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 113E143 nolu “Fotovoltaik kaynaktan beslenen 3-fazlı 4-telli akıllı mikro şebeke yapısının batarya ve ultrakapasitörden oluşan hibrit enerji

depolama sistemi ile geliştirilmesi” adlı 1001 projesi tarafından desteklenmiştir.

Bu çalışma, TÜBİTAK 2211 “Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Yüksek Lisans Burs Programı” tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Linden D., Reddy T. B., “Handbook of Batteries”, David Linden, *McGraw-Hill Press*, 3d ed., New York, (2001).
2. Scrosati B., Garche J., “Lithium batteries: Status, prospects and future”, *Elsevier Journal of Power Sources*, 195: 2419-2430, (2010).
3. Rydh C. J., Sanden B. A., “Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part I: Performance and energy requirements”, *Elsevier Energy Conversion and Management*, 46: 1957-1979, (2005).
4. Divya K. C., Jacob Q., “Battery energy storage technology for power systems-An overview *Elsevier Electric Power Systems Research*, 79: 511-520, (2009).
5. Whittingham M. S., “History, Evolution, and Future Status of Energy Storage”, *Proceedings of the IEEE Issue Special Centennial*, 100: 1518-1534, (2012).
6. Chih A., Hua C., Zong B., and Syue W., “Charge and Discharge Characteristics of Lead-Acid Battery and LiFePO₄ Battery”, *International Power Electronics Conference*, Sapporo, Japan, 1478-1483, (2010).
7. Swierczynski M., Store I. D., and Stan I. A., Teodorescu R., Vikelgaard H., “Selection and impedance based model of a lithium ion battery technology for integration with Virtual Power Plant”, *15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, Germany, 1-10, (2013).
8. Gao J., Zhang Y., and He H., “A Real-Time Joint Estimator for Model Parameters and State of Charge of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles”, *Energies*, 8: 8594-8612, (2015).
9. Bae K., Choi S., and Kim J., “Won C., Jung Y., LiFePO₄ Dynamic Battery Modeling for Battery Simulator”, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Busan, Korea, 354-358, (2014).
10. Hamidi S.A., Ionel M.D., and Nasiri A., “Modelling and Management of Batteries and Ultracapacitors for Renewable Energy Support”, *Electric Power Components and Systems*, 43: 1434-1452, (2015).
11. Chen M., Rincon-Mora G.A., “Accurate Electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance” *IEEE Transactions Energy Conversion*, 21: 504-51, (2006).
12. Rakhmatov D., Vruthula S., and Wallach D.A., “A model for battery lifetime analysis for organizing applications on a pocket computer”, *IEEE Transactions VLSI Systems*, 11: 1019-1030, (2003).
13. Kırçıçek Y., “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Destek için Kullanılan Batarya ve Ultrakapasitör Depolama Birimlerinin Modellenmesi ve Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı, (2016).
14. Jongerden M.R., Haverkort R., “Which battery model to use?”, *IEEE IET Software*, 3: 445-457, (2009).

Polipropilen Lif Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

İlker Bekir TOPÇU¹, Onur Enes DEMİREL¹, Tayfun UYGUNOĞLU^{2*}

¹Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

²Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Böl., Afyonkarahisar

(Geliş/Received : 09.06.2016 ; Kabul/Accepted: 10.06.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, dört farklı görünüm oranındaki polimer esaslı polipropilen lifin harç özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Öncelikle lif katkısız kontrol numunesi üretilmiştir. Lifler harç içine hacimce %0.6, %0.8, %0.9, %1.1 oranlarında katılmıştır. Harçlar üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases hızı, su emme, dinamik elastisite modülü ve mikroyapı incelemesi yapılmış ve kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçlarına göre, polipropilen lif katkısının harçlar üzerinde basınç dayanımını bir miktar düşürdüğü, eğilme dayanımını bir miktar artırdığı, su emmelerinin lif tipine göre değiştiği ve elastisite modülünün de düştüğü görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Polipropilen Lif, Lif Hacmi, Çimento Esaslı Harç, Sertleşmiş Harç Özellikleri.

Physical and Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Mortars

ABSTRACT

In this study, the effects of polymer based polypropylene fibers with four aspect ratios type on mortar properties have been investigated. Firstly, control samples were produced without fibers. The fibers were added to mortar mixtures in ratio of 0.6% 0.8% 0.9% and 1.1% by volume. On the mortars, compressive strength, flexural strength, ultrasonic velocity, water absorption and dynamic modulus of elasticity were defined and compared with control samples. According to experimental results, it was seen that when the compressive strength and dynamic modulus of elasticity was decreased by addition of fibers to mortar, bending strength and water absorption was slightly increased.

Keywords: Polypropylene Fiber, Fiber Volume, Cement Based Mortar, Hardened Mortar Properties.

1. GİRİŞ (INRODUCTION)

Yapı malzemelerinin belirli özelliklerini iyileştirmek için bu malzemelere katılan lifler önceleri bitkisel kökenliler olurken günümüz teknolojisi ile cam, çelik ve polimer esaslı liflerin de kullanım olanakları ortaya çıkmıştır. Cam liflerinin özellikle alkali ortamlarda durabilite açısından sorun oluşturması nedeniyle günümüzde beton içerisine çelik ve polimer esaslı lifler ilave edilmektedir. Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemelerinden beton, aşınma, çekme, kayma, çatlama sonrası yük taşıma, tokluk, yangına karşı dayanıklılığı ve enerji emme kapasitesi zayıf olan bir malzemedir [1-3]. Zayıf olan bu özelliklerini iyileştirmek için birçok çalışma yapılmıştır. Betonda ani kırılmayı önleyebilmek ve betonun sünekliğini artırabilmek için beton içerisinde farklı mekanik ve fiziksel özeliğe sahip lifler kullanılmaktadır. Fiziksel ve mekanik özellikleri farklı olan bu lifler, beton karışımı içerisinde karma olarak da kullanılarak, çok gevrek davranış gösteren yüksek dayanımlı betonlara süneklik kazandırma da ve zayıf yönleri daha da iyileştirmede katkı sağlamaktadır [4,5].

Betonlara katılan polipropilen lifler belli oranda katılmalıdır. Liflerin özelliklerine göre polipropilen lif katkılı betonlar günümüzde özel uygulamalarda kullanılmaktadır [6]. Özellikle son yıllarda beton teknolojisindeki gelişmelerle birlikte, basınç dayanımı çok yüksek olan betonlar, yüksek yapılar, köprüler, deniz altı yapıları, nükleer santraller gibi önemli yapılarda kullanılmaya başlanmıştır [7,8].

Polipropilenlerin en önemli özelliklerinden birisi betonda oluşacak plastik rötre çatlaklarını sınırlamasıdır. Bu betonlar günümüzde özellikle yol inşaatlarında, endüstriyel döşemelerde, havaalanı pist kaplamalarında, su yapılarında, püskürtme betonlarda, şev stabilitesi problemi olan yamaçlarda, ince kabuk yapılarında, beton borularda, yüksek sıcaklığa maruz yapılarda, askeri yapılarda, öngermeli yapılarda, dış cephe mantolama uygulamalarında kullanılan sıvaların içinde için sıvaların içinde ve daha birçok inşaatlarda kullanılmaktadır [9,10]. Özellikle betonun içindeki boşlukları doldurmak, rötre ve büzülme çatlaklarını azaltmak, betonun darbeye karşı dayanımını artırmak gibi önemli faydalar sağladığı için son yıllarda ülkemizde önde gelen beton şirketleri de polipropilenli beton üretimini artırmıştır [11,12].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: uygunoglu@aku.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 91-96

Bu çalışmada, farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip polipropilen lifler harç karışımı içerisinde farklı oranlarda kullanılmıştır. Özellikle polipropilen liflerin mikro çatlama önlemesi sayesinde hazır harç, sıva harcı ve tamir harcı gibi çimento esaslı kompozitlerde kullanımları oldukça yaygındır. Bu nedenle, bu çalışmada öncelikli olarak sertleşmiş harç deneylerine yer verilmiştir. Ayrıca betonun en önemli özelliği olan basınç dayanımını azami koruyacak ve diğer zayıf yönlerini geliştirebilecek en uygun polipropilen lif tipi ve oranını tespit etmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma sonunda polipropilen liflerin harçların sertleşmiş haldeki özelliklerini nasıl etkilediği araştırılmıştır.

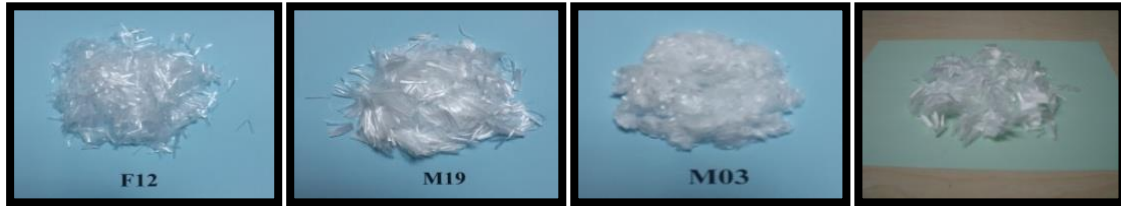
2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

2.1. Kullanılan Malzemeler (Materials used)

Numunelerin hazırlanmasında hidrolik bağlayıcı olarak TS EN 197-1 [13] standardına uygun olarak üretilmiş olan CEM I-42.5/R tipi Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır. Çimentonun Blaine incelik değeri 3312 cm²/g ve özgül ağırlığı da 3.1'dir. Çimentoaya ait kimyasal oksit değerleri Çizelge 1'de sunulmuştur. Agrega olarak standart kumun kullanıldığı harçlarda dört farklı görünüm oranlarında polipropilen lif kullanılmıştır. Liflerin karakteristik özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir

kodlu polipropilen liflerdir. Yapılan deneylerin hepsinde 40x40x160 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalar toplamda 48 seri harç karışımı üzerinde yapılmıştır. Bu karışımlardan bir tanesi kontrol karışımı olup diğerleri polipropilen lifli karışımlardır. Karışım içerisine giren polipropilen lif miktarları; M03:0.0105 kg/dm³, M06:0.0141 kg/dm³, F12:0.0158 kg/dm³, M19:0.0193 kg/dm³tür.

Harçlar, üretimlerini takiben 24 sa sonra kalıptan alınıp 20±2 °C kirece doymun su içerisinde 27 gün kör edilmişlerdir. Bir gün laboratuvar ortamında bekletilen harçlar üzerinde 28 günlük basınç, eğilme, su emme, ultrases geçiş hızı gibi deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneylere fiziksel özelliklerden başlanılmıştır. Numuneler etüv kuru hale getirilip ağırlıkları alındıktan sonra ultrases geçiş hızları belirlenmiştir. Daha sonra, 24 sa su içerisinde doymun hale getirilmiş ve su emme değerleri belirlenmiştir. Mekanik özelliklerin belirlenmesinde otomatik basınç ve eğilme presi kullanıldı. Basınç presinin kapasitesi 200 kN olup, eğilme presinin kapasitesi de 50 kN'dur. Eğilme deneyi ortadan yükleme tipiyle 120 mm mesnet açıklığında TS EN 12390-5 [14] standardına göre gerçekleştirildi. Eğilme testi sırasında ikiye ayrılan numuneler yine TS EN 12390-5 [14] standardına göre basınç testi için kullanılmıştır. Numunelerin alt ve üstüne aynı düşey eksen çizgisindeki mesafeye gelecek şekilde 40x40 mm plakalar yerleştirilmiştir. Bu halde basınç presi tablaları



Şekil 1. Polipropilen lifler (Polypropylene fibers)

Çizelge 1. Çimentonun kimyasal bileşenleri (Chemical component of cement)

Bileşen, %	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	KK
PÇ	63.6	19.6	4.72	3.27	1.91	0.34	1.06	4.72	2.69

Çizelge 2. Polipropilen liflerin teknik özellikleri (Technical properties of polypropylene fibers)

Lif	Çap (mm)	Boy (mm)	Narinlik (Boy/Çap)	Çekme Dayanımı (MPa)	Birim Ağırlığı (gr/cm ³)	Erime Noktası (°C)	E- Modülü (MPa)
M03	0.05	3	60	600-700	0.91	150	3500
M06	0.20	6	30	600	0.90	230	3800
F12	0.30	12	40	450-600	0.91	160	3500
M19	0.30	19	63.3	400-500	0.91	160	3500

2.2. Karışımların Hazırlanması ve deneyler (Preparation of mixes and experiments)

Harç bileşeni olarak 450 g çimento, 225 g su, 1350 g standart kum ve farklı oranlarda (%0.6, %0.8 %0.9 ve %1.1) polipropilen lif kullanılmıştır. Polipropilen lifler dört çeşit olup, bunlar; ticari olarak M03, M06, F12, M19

arasına yerleştirilen numunelere basınç yükü uygulanarak TS EN 12390-3 [15] standardına göre dayanım değerleri belirlenmiştir. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen ultrases geçiş hızı ve birim ağırlık deney verileri kullanılarak dinamik elastisite modülleri de aşağıda verilen (1) nolu denklem ile belirlenmiştir.

$$E_d=(10^5 V^2 \Delta \Delta / 9.81) \quad (1)$$

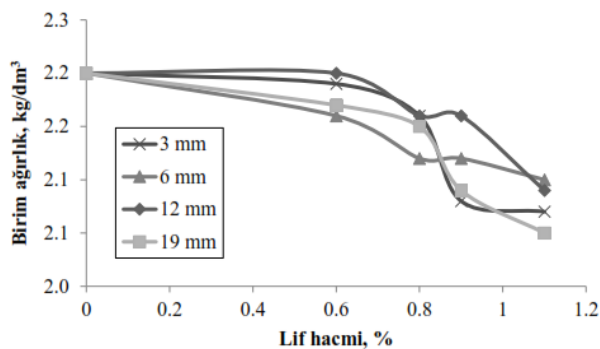
Denklemden, E_d , dinamik elastisite modülünü; V , ultrases geçiş hızını; Δ , birim ağırlığı simgelemektedir [16].

Polipropilen lif içeren ve kontrol numuneleri üzerinde mikroyapı incelemeleri Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknolojik Uygulama ve Araştırma Merkezi (TUAM)'nde bulunan LEO 1430 VP model W (Tungsten) filament ile çalışan taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazında yapılmıştır. Bütün lif tipleri yapı olarak polipropilen olduğundan sadece bir seri üzerinde (M19) SEM görüntüleri alınmıştır. Numuneler kırık yüzeyli hazırlanmış olup, yüzeyleri karbon ile kaplanmıştır.

3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME (RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Birim Ağırlık Deney Sonuçları (Unit weight results)

Harç içerisine ilave edilen farklı boy veya narinlik oranlarındaki polipropilen lifler harçların birim ağırlık değerlerinin azalmasına neden olmuştur (Şekil 2). Harç veya beton içerisine ilave edilen polipropilen liflerin işlenebilirlik değerlerini azalttığı literatürden bilinmektedir [3]. İşlenebilirlikteki azalmanın en büyük nedeni, artan lif miktarıyla topaklaşmanın ortaya çıkması ve bunun sonucunda bileşenlerin hareket kabiliyetlerinin azalmasıdır. İşlenebilirlikteki azalma harç kalıba yerleştirilmesini de etkilemekte ve kısmen de olsa kontrol (lifsiz) harca göre daha boşluklu kalmasına neden olmaktadır. Lif miktarının artmasıyla birlikte kalıba daha boşluklu yerleşmiş olan harçların birim hacim ağırlık değerleri de kontrol harcına göre daha düşük değerler almıştır. En düşük birim ağırlık değerleri tüm lifler için en fazla lif içeriğindeki harçlarda elde edilirken, lif tipi açısından dikkate alındığında en uzun lif (19 mm) içeren harçlarda görülmüştür.

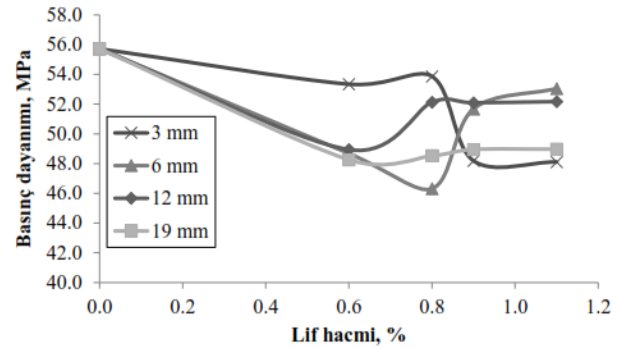


Şekil 2. Polipropilen lif katkıları ile hazırlanan harçların birim ağırlıklarının (Unit weights of polypropylene fiber added mortars)

3.2. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları (Compressive strength results)

Harç içerisine ilave edilen liflerin basınç dayanımı değerleri üzerindeki etkisi incelendiğinde (Şekil 3), lif miktarının basınç dayanımına hem olumlu hem de olumsuz yönde etkisi olmuştur. Bunun sebebi, harca

ilave edilen liflerin harçın işlenebilmesini azalttığından veya harç içerisindeki dağılımının ve yöneliminin etkisi sonucu oluşmuş olabileceği belirtilebilir. Yapılan çalışmalarda da lif içeriğinin betonun basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı ve hatta $\pm\%25$ oranında olumlu veya olumsuz yönde etkileyebileceği belirtilmiştir [17-20].



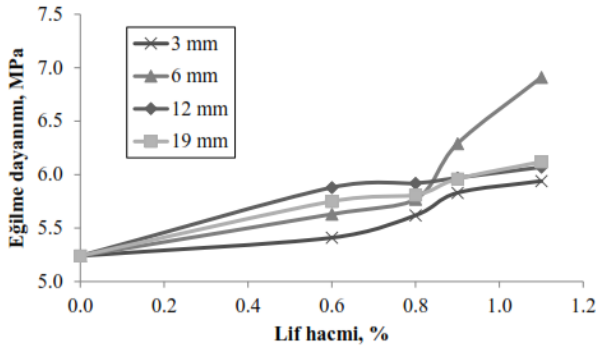
Şekil 3. Polipropilen lif katkıları ile hazırlanan harçların basınç dayanımı sonuçları (Compressive strength results of polypropylene fiber added mortars)

Sonuçlar incelendiğinde; kontrol numunesi basınç dayanımı değeri 55.72 MPa iken, polipropilen lifli karışımların basınç dayanımı değerleri 46.31 MPa ile 53.77 MPa arasında değişerek $\%3.3$ - $\%17$ oranında azaldığı görülmüştür. Buna göre; basınç dayanımı değerlerinin lif katkısı ile birlikte tüm karışımlarda düştüğü görülmüştür. Lif ilavesinin artırılmasıyla birlikte harçların işlenebilirliklerindeki azalmalar yapılan çalışmalardan bilinmektedir [3]. Lif boylarının ve miktarının artmasıyla birlikte harç içerisindeki topaklanma daha fazla olduğundan hem birim ağırlık hem de dayanım değerleri diğer lif tiplerini içeren harçlara göre daha düşük değerler almıştır.

3.2. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Harç içerisine ilave edilen liflerin eğilme dayanımları üzerindeki etkileri incelendiğinde (Şekil 4), lif miktarının artmasıyla eğilme dayanımının da belirgin bir biçimde arttığı görülmektedir. Lifsiz harçın eğilme dayanımı 5.24 MPa civarında iken, lifli harçların eğilme dayanımı değerleri 5.94-6.91 MPa arasında ölçülmüştür. Polipropilen liflerin $\%1.1$ oranında ilave edilmesiyle harçların eğilme dayanımlarında yaklaşık $\%13.3$ - $\%31.9$ oranında artış sağlanabilmiştir. Betona ilave edilen lif miktarıyla doğrudan ilişkili olan eğilme dayanımının, lif tipiyle de doğrudan ilişkili olduğu belirtilebilir. Boyu 6 mm olan liflerin harç içerisinde daha homojen dağılarak eğilme testi sırasında harçın alt bölgelerinde çekme gerilmelerinden dolayı oluşan mikro çatlakları durdurmada daha etkili olduğu ve buna bağlı olarak da lif miktarının da artırılmasıyla birlikte eğilme dayanımının da arttığı görülmüştür. Lif boyu arttıkça harç içerisinde dağılımları sırasında topaklanmaları ve liflerin kıvrılarak etkilerinin azalma riski daha fazla olmakta ve bu da birim ağırlık değerlerinin azalmasından açıkça görülmektedir [18,19]. Basınç dayanımıyla karşılaştırıldığında, kontrol serilerinin eğilme dayanımları basınç dayanımının

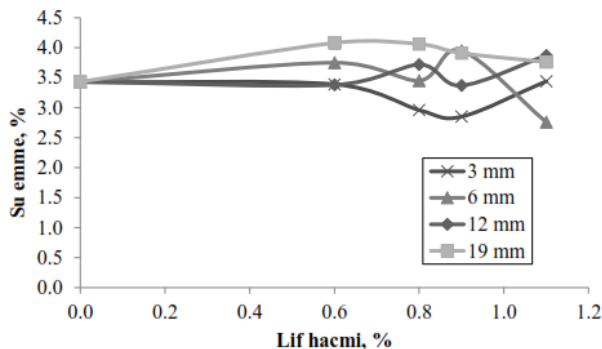
yaklaşık onda birine karşılık gelirken, lif hacminin artmasıyla artan eğilme dayanımları sonucunda, polipropilen katkılı harçların eğilme dayanımları basınç dayanımlarının yaklaşık sekizde birine karşılık gelmektedir.



Şekil 4. Polipropilen lif katkılı harçların eğilme dayanımı sonuçları (Flexural strength results of polypropylene fiber added mortars)

3.3. Su Emme Deney Sonuçları

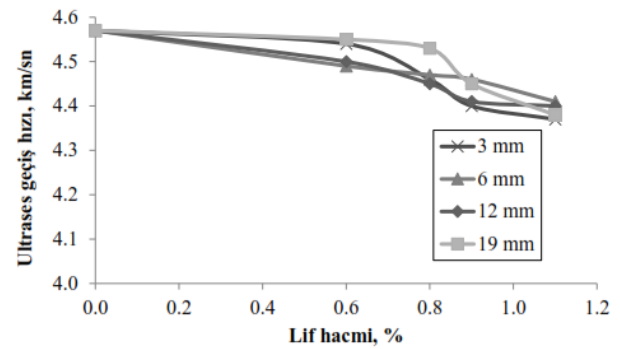
Farklı tipte polipropilen lif içeren harçların ağırlıkça su emme değerleri de belirlenmiştir (Şekil 5). Kontrol numunesinin su emme değeri %3.43'tür. En yüksek su emme değeri yaklaşık %4 oranıyla 19 mm uzunluğundaki lifli harçlarda görülürken, en düşük su emme değeri ise yaklaşık %2.7 değeriyle 3 mm uzunluğundaki lifleri içeren harçlarda elde edilmiştir. Kullanılan lif uzunluğunun artmasıyla harç içerisinde az da olsa boşlukların arttığı sonucuna varılmıştır. Lif miktarının artırılmasıyla da 3 mm lif içeren harçların su emmesi haricindeki serilerde artış görülmüştür. Ancak genel olarak incelendiğinde, polipropilen liflerin su emmeyen yapıda olmaları nedeniyle harçlardaki su emme oranlarındaki artışlar oldukça düşük miktardadır [21,22]. Su emme oranlarındaki artışın nedeni topaklanmaları nedeniyle betonda oluşan boşluklardan dolayıdır. Bu boşluklar aynı zamanda basınç dayanımlarının da kontrol serilerine göre daha düşük değerler almasına da neden olmuştur.



Şekil 5. Polipropilen lif katkılı harçların su emme değerleri (Water absorption values of polypropylene fiber added mortars)

3.4. Ultrases Deney Sonuçları (Ultrasonic Pulse Velocity Results)

Bir beton ortamında ölçülen sismik dalga hızları o ortamın doluluğu veya kompasesi hakkında yeterli ve güvenilir bir fikir verir. Beton ortamında ses geçiş hızının yüksek olması ortamın dolu olduğunu gösterirken, düşük olması da bir miktar boşluk içerdiğinin göstergesidir. Ses dalgaları boşlukta daha yavaş ilerlediklerinden daha düşük değerler elde edilmektedir. Polipropilen lif katkılı harçların da ses geçiş hızları lif miktarının artırılmasıyla birlikte kontrol harcına göre daha düşük değerler almıştır (Şekil 6). Numunelerin ultrases geçiş süreleri kontrol numunesinde 4.57 km/sn olarak hesaplanmıştır. Polipropilenli numunelerin ultrases geçiş hızları ise en fazla lif içeriğinde 4.37 km/sn ile 4.41 km/sn arasındadır. Buna rağmen, belirlenen ultrases geçiş hızları 4 km/sn değerinden daha büyük olduğundan bütün lif katkılı harçlar kaliteli harç sınıfında yer almaktadırlar [16]. Ultrases hızlarındaki azalmanın nedeni de hem kullanılan liflerin polimerik (düşük yoğunluklu) olması hem de liflerin topaklanmaları sonucunda birim ağırlık ile basınç dayanımlarının azalmasına ve su emme oranının artmasına neden olan boşluklardır.

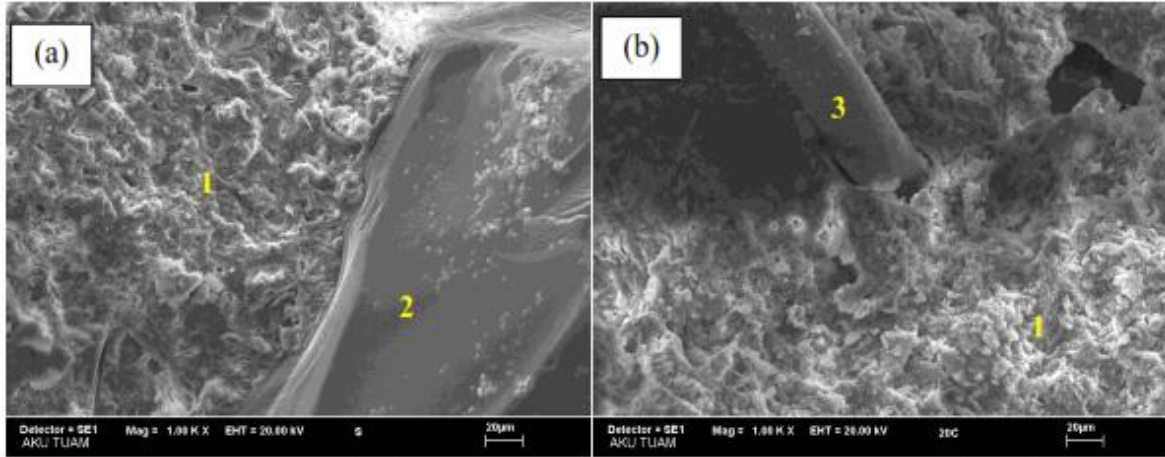


Şekil 6. Lif katkılı harçların ultrases geçiş hızlarının karşılaştırılması (Comparison of ultrasonic pulse velocity of fiber added mortars)

3.5. Elastisite Modülü (Modulus of Elasticity)

Numunelerin geçiş süreleri ve birim ağırlıklarına bağlı olarak belirlenen dinamik elastisite (E) modülü değerleri Şekil 7'de verilmiştir. Kontrol harcının E-modülü 46 GPa değerindeyken, harçların içerisine lif ilave edilmesiyle tüm lif tiplerinde E-modülü değerleri azalmaya başlamıştır. Harçların içerisindeki liflerin en yüksek oranda kullanıldığı harçların E-modülleri 41.6-42.63 MPa arasında değişmektedir. Lif tipine göre fazla değişim olmamasına rağmen lif içeriğine göre dikkate alındığında yaklaşık %10 oranında azalma görülmüştür. Basınç dayanımına benzer şekilde E-modülü de lif içeriğinin artmasıyla birlikte liflerin harç veya beton içerisindeki yönelim ve dağılımlarından kaynaklanan nedenlerden dolayı lif katkısız beton veya harçlara göre $\pm\%25$ oranları arasında değerler alabilmektedir [17]. Birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı sonuçlarında olduğu gibi liflerin kullanım oranlarının artmasıyla birlikte topaklaşma sonucunda oluşan boşlukların artması sonucunda daha düşük ultrases geçiş hızı

kırık yüzey numune hazırlanması sırasında oluşmuş

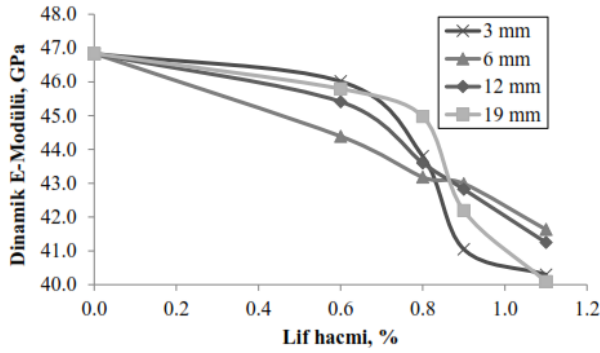


Şekil 8. a) Lifsiz harç; b) lifli harç mikroyapısı (1: çimento harcı; 2: agrega; 3: polipropilen lif)

(microstructure of mortar a: Plain mortar; b: mortar with fiber; 1: hydrated cement; 2: aggregate; 3: polypropylene fiber)

ölçülerek yine daha düşük değerlerde dinamik elastisite modülü değerleri belirlenmiştir.

Buna rağmen polipropilen lif üzerinde hidrasyon ürünlerine de rastlanmıştır. Zaten eğilme dayanımlarının lif hacmiyle artış göstermesi adreansın da çok zayıf olmadığını göstermektedir



Şekil 7. Dinamik elastisite modülü (Dynamic modulus of elasticity)

3.6. Mikroyapı incelemesi (Microstructure)

Çimento esaslı harç içerisindeki hidrate ürünlerin dağılımları ile polipropilen liflerin harç arasındaki aderanslarının gözlenmesi amacıyla mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Kontrol hacında yapılan mikroyapı gözleminde, agrega etrafında, oldukça yoğun çimento hidrasyon ürünleri görülmüştür. Agregayla çimento hamuru arasındaki bu kuvvetli aderans sayesinde harçlar üzerinde oldukça yüksek basınç ve eğilme dayanımları ile yüksek ultrases hızı, düşük su emme değerleri elde edilmiştir. Lif katkı harçlarda yapılan mikroyapı gözlemi sonucunda da polipropilen lif etrafında oldukça yoğun hidrasyon ürünleri olmasına rağmen aderansın tam olarak sağlanmadığı gözlenmiştir. Bunun muhtemel nedenleri, i) çimento esaslı bağlayıcıyla polimer esaslı lif malzemesinin iki farklı yapıya sahip olması; ii) aderans bölgesinde gözlenen mikro düzeydeki zayıf bölgenin

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Polipropilen lifli betonlar ve harçlar günümüzde gelişim göstermekte olup birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada farklı tipte (uzunlukta) ve oranda polipropilen katkı çimento esaslı harçların mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Polipropilen katkı harçlar üzerinde yapılan basınç deneyi sonucunda, polipropilen liflerin dağılım ve yöneliminden dolayı basınç dayanımının %3-17 oranında azaldığı elde edilmiştir.
- Polipropilen lif katkı harçlar üzerinde eğilme dayanımı deneyi yapıldığında, lif katkısının harçlarda eğilme dayanımını yani çekme dayanımını yükselttiği görülmüştür.
- Polipropilen lif katkı harçlar üzerinde yapılan ultrases deneylerinden genellikle polipropilen miktarı arttıkça numunelerin ultrases geçiş hızlarının düştüğü görülmüştür,
- Dinamik E-modülleri de basınç dayanımına benzer şekilde lif içeriğinin artışıyla azalmış ve %1.1 lif kullanılması durumunda kontrol harçlarına göre %10 oranında azalma görülmüştür.
- Polipropilen lif katkı harçlar üzerinde yapılan su emme deneyleri sonuçlarına göre, lif tipinin değişmesiyle, diğer bir ifadeyle lif uzunluğunun artmasıyla su emme değerleri de artmıştır. Diğer yandan diğerlerine göre daha kısa olan lif hacminin artışıyla su emme değerleri azalırken, nispeten daha uzun olan liflerin miktarının artışı da harçların su emme miktarının yükselmesine neden olmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kakooei S., Akil H.Md., Jamshidi M. and Rouhi J., "The effects of polypropylene fibers on the properties of reinforced concrete structures", *Construction Building Materials*, 27(1): 73-77, (2012).
- [2] Fakharifar A, Arezoumandi M, Sharbatdar, M.K., Chen G. and Kheyroddin A., "Mechanical properties of high performance fiber reinforced cementitious composites", *Construction Building Materials*, 71: 510-520, (2014).
- [3] Açıkgenç M., Arazsu U. and Alyamaç K.E., "Farklı karışım oranlarına sahip polipropilen lifli betonların dayanım ve durabilite özellikleri", *SDU International Technologic Science*, 4(3): 41-54, (2012).
- [4] Alani A.M. and Beckett, D., Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab, *Construction and Building Materials*, 41: 335-344, (2013).
- [5] Hsie M., Tua C. and Song, P.S., "Mechanical properties of polypropylene hybrid fiber-reinforced concrete", *Materials Science and Engineering A*, 494: 153-162, (2008).
- [6] Nili M. and Afrouhsabet V., "The effects of silicafume polypropylene fibers on The impact resistance mechanical properties of concrete", *Construction Building Materials*, 24(6): 927-933, (2010).
- [7] Bošnjak J., Ožbolt J. and Hahn R. "Permeability measurement on High strength concrete out with polypropylene fibers at elevated temperatures using a new test setup", *Cement and Concrete Research*, 53-55, (2013).
- [8] Afrouhsabet V. and Ozbakkaloglu T, "Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, 94: 73-82, (2015).
- [9] Martinez-Barrera G.,Urena-Nunez F., Gencil O. and Brostow W., "Mechanical properties of polypropylene-fiber reinforced concrete after gamma irradiation", *Composites: Part A*, 42-44, (2011).
- [10] Grdic Z.J., Curcic G.A.T., Ristic N.S. and Despotovic, I.M., "Abrasionresistance of concrete micro-reinforced with polypropylene fibers", *Construction and Building Materials*, 27: 305-312, (2012).
- [11] Salemi N. and Behfarnia K., "Effect of nano-particles on durability of fiber-reinforced concrete pavement", *Construction and Building Materials*, 48: 934-941, (2013).
- [12] Asokan P., Osmani M. and Price A.D.F., "Improvement of the mechanical properties of glass fibre reinforced plastic waste powder filled concrete", *Construction and Building Materials*, 24(4): 448-460, (2010).
- [13] TS EN 197-1, Çimento- Bölüm 1: Genel ÇimentolarBileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2012).
- [14] TS EN 12390-5, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 5: Deney numunelerinin eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2010).
- [15] TS EN 12390-3/AC, Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2012).
- [16] Erdoğan T.Y., "Beton", ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayn. ve İletişim Şti, 130-160, Ankara, Mayıs, (2003).
- [17] Fanella D.A. and Naaman A.E., "Stress-Strain Properties of Fiber Reinforced Concrete in Compression", *Journal of ACI Materials*, 82 (4): 475 – 483, (1985).
- [18] Khaloo A.R. and Afshari M., "Flexural Behavior of Small Steel Fiber Reinforced Concrete Slabs", *Cement and Concrete Composites* 27: 141–149, (2005).
- [19] Uygunoğlu, T., "Investigation of microstructure and flexural behavior of steel-fiber reinforced concrete", *Materials and Structures*, 41(8): 1441-1449, (2008).
- [20] Ersoy, H.Y., "Kompozit Malzeme", Literatür Yayınları, Mimarlık Dizisi, ISBN:975-8431-47-1, (2003).
- [21] Ramezaniapour A.A., Esmaeili M., Ghahari S.A. and Najafi M.H., "Laboratory study on the effect of polypropylene fiber on durability, and physical and mechanical characteristic of concrete for application in sleepers", *Construction and Building Materials*, 44: 411-418, (2013).
- [22] Zhang P. and Li Q., "Effect of polypropylene fiber on durability of concrete composite containing fly ash and silica fume", *Composites: Part B*, 45(1): 1587–1594, (2013).

Determination of Protection and Relay Coordination Strategy in Electrical Power Systems Based on Renewable Energy Generation Resource Using Petri Net Method

Nihat PAMUK

Turkish Electricity Transmission Company, Sakarya, Turkey

(Received : 21.04.2016 ; Accepted: 22.04.2016)

ABSTRACT

The principle of protection in electrical power system targets to determinate at timely of accruing faults and to isolate at the most appropriate time of the faulted sections of the power grid. This situation is realized through coordination among the protective devices. The involvement of renewable energy generation resources to the energy transmission system complicates the network protection, thus undermining the security coordination or decreasing the protection coordination zone. In particular, such issues become even more vigorous in power networks with effect of renewable energy resource generations. Therefore, the conventional power protection methods are insufficient in such networks, requiring software strategies involving the renewable energy generation resources. For that purpose in this study, Petri net method is used for estimating the faulted section in power transmission network in the presence of renewable energy generation resources and designing of protection coordination schemes. The information about the status of protection elements acquired from the automation system was adopted as input to the Petri net method. Renewable energy resource generations effect can increase the risk of disharmony among protection systems. The accuracy of Petri net models are improved by phase angle shifts in the voltage waveforms of renewable energy generation resources and the main power supply using Fast Fourier Transform (FFT) through which the Petri net model inputs was corrected.

Keywords: Electrical Power System, Protection Coordination Strategies, Automation, Petri Nets Method.

Petri Ağı Yöntemi Kullanılarak Yenilenebilir Enerji Üretim Kaynaklı Elektriksel Güç Sistemlerinde Koruma ve Röle Koordinasyon Stratejisinin Belirlenmesi

ÖZ

Elektriksel güç sistemindeki koruma prensibi oluşacak olan arızaların zamanında belirlenmesini ve güç şebekesindeki arızalanmış kısımların en uygun zamanda izole edilmesini amaçlar. Bu durum koruma cihazları arasındaki koordinasyon sayesinde gerçekleştirilir. Enerji iletim sistemlerine yenilenebilir enerji üretim kaynaklarının bağlanması güvenlik koordinasyonunun devre dışı kalmasına veya koruma koordinasyon bölgesinin azalmasına sebep olarak sistem korumasını karmaşıklaştırmaktadır. Özellikle bu tarz sorunlar yenilenebilir enerji üretim kaynaklarının etkisindeki güç şebekelerinde daha da şiddetli hale dönüşür. Bu nedenle, geleneksel güç koruma yöntemleri yenilenebilir enerji üretim kaynakları içeren yazılım stratejileri gerektiren bu tür şebekelerde yetersizdir. Bu amaçla bu çalışmada, yenilenebilir enerji üretim kaynaklarının var olduğu güç iletim şebekelerindeki arızalanmış bölümlerin tahmin edilmesi ve koruma koordinasyon şemalarının tasarlanması için Petri ağı metodu kullanılmıştır. Petri ağı yöntemine giriş olarak otomasyon sistemlerinden elde edilen koruma elemanlarının durumu hakkındaki bilgiler kabul edilmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklı üretimlerin etkisi koruma sistemleri arasındaki uyumsuzluğun riskini arttırabilir. Petri ağı modellerinin doğruluğu yenilenebilir enerji üretim kaynaklarına ait gerilim dalga formlarındaki faz açısı değişimleri tarafından geliştirilmiştir ve ana güç kaynağı Petri ağı model girişleri sayesinde Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) kullanılarak düzeltilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektriksel güç sistemi, Koruma koordinasyon stratejileri, Otomasyon, Petri ağları yöntemi.

NOMENCLATURE

P: Place

T: Transition

M: Marking Vector

R: Relay

CB: Circuit Breaker

BLR: Blocking Under Voltage Protection Relay

MLR: Main Directional Protection Relay

SLR: Substation Local Backup Protection Relay

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: npamuk@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 97-110

LXsm:	X th Transmission Line Overload Protection Relay
LXsp:	X th Transmission Line Overvoltage Protection Relay
LXrs:	X th Transmission Line Phase Fault Protection Relay
LXRm:	X th Transmission Line Earth Fault Protection Relay
LXRp:	X th Transmission Line Overlap of Protection Relay
TXs:	X th Circuit Breaker Failure Protection Relay
PNM:	Petri Net Method
FFT:	Fast Fourier Transform
PACs:	Phase Angle Changes
REGs:	Renewable Energy Generation Resources
SCADA:	Supervisory Control And Data Acquisition

1. INTRODUCTION

The power transmission systems are the closest sectors to the industrial consumer. Hence, it is a top priority to ensure their protection. Any interruption in the energy exchange and untimely pause in the transmission lines will lead to complete shutdown. The downtime and the damage can be minimized through immediate detection of the defective element or the potential failure in order to be carefully isolated from the rest of the power system [1]. On the other hand, the connection of renewable energy generation to the power systems is increasingly growing due to its technical, economic and environmental advantages [2], [3]. In addition to its multiple advantages, the involvement of the "Renewable Energy Generation Resources" (REGs) in the power transmission network will cause problems such as disordered protection devices, protection blindness, increase and decrease in the level of short circuit current, unwanted power network islanding and re-closer asynchronization [4], [5].

In recent years, several methods have been proposed for fault detection and estimation of fault section in a power transmission system. In article [6] effort was mainly made to improve a model for performance of protection and detection devices through Petri net models, by which the fault display alarms and security relay alarms and monitoring of automation system are performed. With respect to the effects of REGs engagement, such alarms will be further affected, thus overshadowing the monitoring procedure [4]. At the same time, the proposed Petri net model has a weakness in monitoring.

In references [3], [5] a method was proposed for monitoring the protective system of power transmission networks involving REGs based on Petri nets. Accordingly, the defect of high current protection relay was detected through the Petri net. In these articles, the fault current and the protective device coordination curve were adopted even though it was not clear how the fault

current were used in the models. In addition, the accurate detection of faults by the models proposed in these articles, there should be complete information about the occurrence of faults on the transmission line. This is contradictory to the purpose of fault detection performed on the basis of knowledge control center. In this way, it is not clear whether any fault has occurred according to the knowledge control center, or whether the inaccurate knowledge has been received due to unreliable data or protective inconsistency, thus leading to the operator's mistake.

Reference [7] focused on protection of looped power transmission systems based on Petri net involving the REGs. The target of this paper is to provide a supporting protective structure for REGs in the power network, where the Petri net model is used to monitor the proper protection of REGs. This article did not explore how the protective devices coordinated after adding the structure. In fact, a model has been presented on how the protective system functions through the Petri net. Furthermore, little has been discussed about how the knowledge is received from the control center as the suggested model are based on case study not enjoying accuracy and comprehensive effectiveness. None of these studies suggested a perfect model of power system fault detection in the presence of REGs and how to identify the malfunctioning protective devices due to the impact of REGs.

These imply the need for software measures to protect the power transmission network, especially when involving the REGs. Since the power transmission system automation techniques have been widely accepted and the communication substructure has well been improved, the protection scheme based on microprocessors can be employed with communication facilities [8], [9]. For this purpose, the status of protective elements of the transmission system can be achieved by the Energy Control Center, which can in turn be applied for detecting faults in the power transmission networks. The restoration of an electrical power system under the critical fault conditions requires not only great skill and information of the system components, system performance and how the protective relays function, but also accurate and rapid decisions made based on relevant information. Such important and complex tasks can be accomplished by Petri net models. For that purpose, this paper adopted a new tool as Petri net models for the detection of faults in the power transmission network involving the REGs. These models carry out the detection and localization of faults much faster and far more reliably than human operators.

This study was written to present a methodology of multi-criteria selection for relay coordination strategy scheme for power system using Petri Nets Method (PNM). The PNM is a method to derive ratio scales from paired comparisons which obtained from actual criteria's and alternatives and has been identified as a suitable technique for dealing with complex decision making especially during breakdown happened. Renewable energy resource generations effect can increase the risk

of disharmony among protection systems. The idea of proposing this methodology to power system came out when the large contingency occurs and had effected to major shutdown to one of the system ring which had happened. The accuracy of Petri net models are improved by phase angle shifts in the voltage waveforms of renewable energy generation resources. The application of “DIGSILENT Power Factory V14” software have been used to analyzed the actual data and it is very reliable software to be amended in future if any data have been updated. The result and discussion also being discussed and well justified using Phase Angle Changes (PACs) and Fourier Transform (FFT) for better understanding on the finding results. As a conclusion, the PNM is a very reliable method to be used for relay coordination strategy scheme and several recommendations were proposed to ensure the reliability of the method will be parallel with the upgraded power system in future.

2. AN INTRODUCTION TO PETRI NETS

The Petri net was first suggested by Adam Petri in 1962 as a tool for modeling computer systems. Petri net is an ideal strategy for graphical modeling based on mathematical logic [10]. Petri nets can be employed for modeling, describing and analyzing systems with concurrent, distributed, parallel or random nature [11], [12]. Petri net is a combination of four elements expressed as $C = (P, T, I, O)$ where P is a set of places, T is a set of transitions, I is the input function and O is the output function. Functions I and O bridge between the transitions (T) and places (P) interconnecting the elements P and T . I is an input function and it's a mapping of transition t_i to the set of places. $I(t_i)$ is known as transition input places. O is an output function and it's a mapping of transition t_i to each of the places. $O(t_i)$ is known as output places. The structure of Petri net is defined by places, transitions, input and output functions. Moreover, set of places (P) and set of transitions (T) are formulated in equation 1.

$$\begin{aligned}
 P &= \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}, \quad n \geq 0 \\
 T &= \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}, \quad m \geq 0
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

$P \cap T = \Phi$, The set of places and transitions are disjoint.

$I : T \rightarrow P^\infty$: The input function is a mapping from transitions to the bags of places which are specified as input places to transitions and P^∞ shows the bags of places.

$O : T \rightarrow P^\infty$: The output function is a mapping from transitions to the bags of places which are specified as output places to transitions.

Place p_i is an input place from transition t_i , where if $p_i \in O(t_i)$ is true then $p_i \in I(t_i)$ is an output place.

As for the Petri net graph, there are two types of nodes defined: Place indicated in the form of a circle and transition indicated in the form of a rectangular (\square) or vertical line ($|$). Furthermore, a number of directed arcs (arrows) are connected from places to transitions (input places), while the other directed arcs are connected from transitions to places (output places) [13], [14]. Places represent the "status" such as a memory, as the transitions represent an "event" such as faults. Figure 1 displays an example of a Petri net graph.

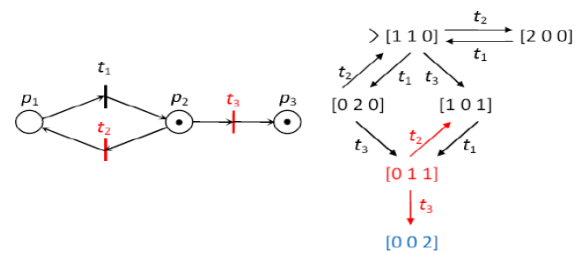


Figure 1: An example Petri net graph

The structure of Petri net and the process of firing transitions can be expressed and analyzed using matrix operations. To do this, the original matrices C , M and U respectively structure, marking and firing vectors are required. The structure matrix is used to represent the topology of Petri nets. The dimensions of this matrix are $|P| \times |X| \times |T|$ defined as equation 2.

$$C(p, t) = \begin{cases} -w(p, t) & \text{if } (p, t) \in F \\ w(p, t) & \text{if } (t, p) \in F \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}
 \tag{2}$$

Where $|P|$ and $|T|$ are respectively the number of sets P and T , $w(p, t)$ is the weight of arc from P to T , and F is the set of arcs. Moreover, $(p, t) \in F$ implies there is a link from p to t . For example, the matrix structure of the Petri nets in figure 1 is represented in equation 3.

$$C = \begin{matrix} & \begin{matrix} t_1 & t_2 & t_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}
 \tag{3}$$

The marking vector $M_{|P| \times |X| \times |1|}$ illustrates the number of tokens in places. Element 1 or more in this vector illustrate the number of tokens in the corresponding place, while element 0 implies there are no tokens in the corresponding place. The dynamic behavior of Petri nets in figure 1 can be formulated as equation 4, where M_0 is the primary marking vector. References [15, 16] totally described hot to analyze and utilize equations 1 to 4.

$$M_1 = M_0 + CU \quad (4)$$

The integer vector C, and incidence matrix U are defined by equation 4. The expression of CU is defined as multiplication of incidence matrix (ratio of tokens) with integer vector. Equation 4 provides a necessary but not sufficient condition; all markings reachable from M_0 are solution of equation 4, but not vice versa. A solution to equation 4 exists for any integer vector, but the transition firing sequence represented by integer vector.

3. THE APPLICATION OF PETRI NETS MODEL IN RELAY COORDINATION STUDY

As defined in the IEEE standard, power transmission automation is a system that enables a power transmission company for remote monitoring, coordinating and commanding over the power transmission equipment in real-time and long distances [17]. In general, the remote control and monitoring systems entail one or several control centers as controller stations and a number of terminals as stations under control. Terminals are installed at remote stations, which collect and prepared the information required by the center. This information is recorded and processed at the center which sends the control commands. These commands are received at the terminal and are applied through the mediator equipment to the systems under control [4]. The proposed method is applied to the high-penetration 30-bus power transmission network of REGs [18]. Figure 2 is a single-line view of 30-bus power transmission network. The system information has been given in [19]. It should be noted that, according to [20], the numerical order of relays is based on the number of corresponding power transmission line.

Hence, relay R_i , is for power transmission line number i (L_i) and relay R_{REGsj} , is for renewable energy generation resources $REGsj$ ($i = 1, 2, 3, \dots, 30, j = 1, 2, 3, \dots, 6$). For example, relay R_1 is for power transmission line number 1 ($Line_1$), relay R_2 is for power transmission line number 2 ($Line_2$) and relay R_3 is for power transmission line number 3 ($Line_3$). Relays R_{REGs1} , R_{REGs2} and R_{REGs3} are related to the renewable energy generation resources G_1 , G_2 and G_3 , respectively. In this study, the test system was simulated through “DIgSILENT Power Factory V14” software. At the next stage, the suggested method was implemented by writing the information of voltages as three cycles in each fault through MATLAB software.

The aim of the study is presented for determining the maximum capacity of REGs for maintaining the relay coordination of power transmission system's protection devices. The Petri Net Method (PNM) is able to do all kind of relay coordination owing to time difference flexibility between selectivity zones in simulation. PNM is based on dividing an existing power transmission network into several zones which each of them is capable of operating in islanding mode. Relay coordination with both compulsory instant setting and without instant setting, time-selectivity and instantaneous selectivity are made in relay coordination via DIgSILENT Power Factory V14 software. The standard inverse time-current characteristic form is used based on IEC 255-3 standard in the relay coordination. Instantaneous operating modes are used in single line, two lines and three lines phase-short circuit current. Tripping at the requested time at 10 times of the nominal current of the backup protection is provided in inverse-time study mode. The result and discussion also being discussed and well justified using

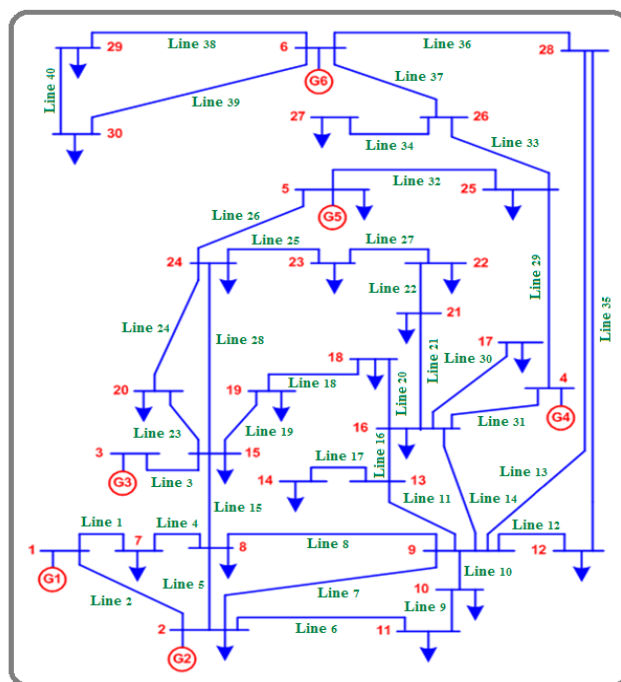


Figure 2: A single line view of 30-bus power transmission network [18].

Phase Angle Changes (PACs) and Fourier Transform (FFT) for better understanding on the finding results. In the suggested approach, the contribution of REGs in fault current is limited through considering mathematical equations of characteristics of protection devices. Consequently, the numerical results are presented in order to confirm the authenticity of suggested approach. The PNM is a very reliable method to be used for relay coordination strategy scheme and several recommendations were proposed to ensure the reliability of the method will be parallel with the upgraded power system in future. The protection principle is shown in Figure 3.

the protection system associated with R_1 are shared by these protection systems, and hence no common modes of failure between R_1 and R_4 , R_9 and R_{10} are possible. These remote backup protections will be slower than R_1 , R_2 or R_3 ; and also remove additional elements of the power system namely lines 5, 7 and 6 from service, which would also de-energize any loads connected to these lines. A similar set of backup relays is used for the power system behind bus station 1.

Figure 4 indicates the Petri net model for relay coordination study in power transmission line 2 of the 30-bus power transmission network under study. In this

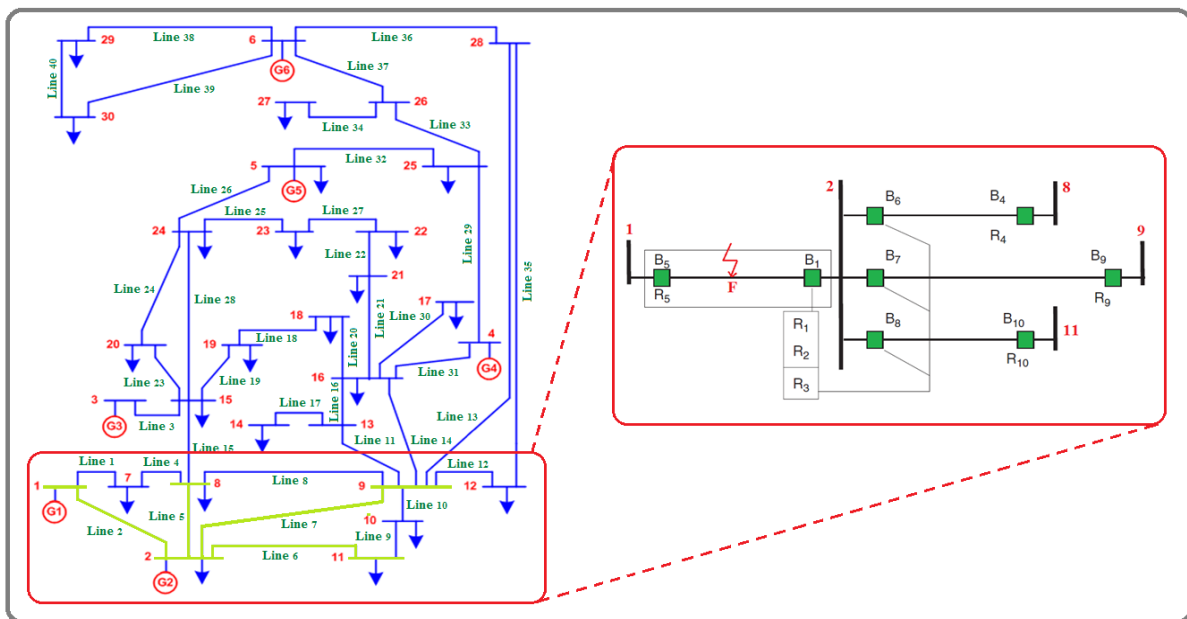


Figure 3: Duplicate primary, local backup and remote backup protection principles for line 2

The fault is assumed at location F. It is inside the zone of protection of transmission line 2. Primary relays R_1 and R_5 will clear this fault by acting through circuit breakers B_1 and B_5 . At bus station 2, a duplicate primary relay R_2 may be installed to trip the circuit breaker B_1 to cover the possibility that the relay R_1 may fail to trip. R_2 will operate in the same time as R_1 and may use the same or different elements of the protection chain. For instance, on transmission lines it is usual to provide separate circuit transformers, but use the same potential device with separate windings. The circuit breakers are not duplicated but the battery may be. On lower voltage circuits it is not uncommon to share all of the transducers and direct current (DC) circuits. The local backup relay R_3 is designed to operate at a slower speed than R_1 and R_2 ; it is probably set to see more of the power system. It will first attempt to trip circuit breaker B_1 and then its circuit breaker failure relay will trip circuit breakers B_5 , B_6 , B_7 and B_8 . This is local backup relaying, often known as circuit breaker failure protection, for circuit breaker B_1 . Relays R_9 , R_{10} and R_4 constitute the remote backup protection for the primary protection R_1 . No elements of

model, the data for protective elements were used as model input. In Figure 4, places CB_{12} , CB_6 , CB_{27} , CB_{13} , CB_{14} , CB_{15} , CB_{32} , CB_8 , L_{2S} , T_{3S} and T_{4S} represent the corresponding relays in Figure 2, which are the main protection for power transmission line 2 according to [21]. Place L_{2R} represents relay transmission line 2 in figure 2, which is the first backup protection for relay L_{4R} according to [22]. Similarly, relays CB_7 , CB_{11} , CB_4 , CB_5 , CB_{28} , T_{1S} , T_{2S} , L_{1Sm} and L_{1Rm} are secondary backup protection relays for transmission line 2 where L_{3R} is for transmission line 4 while and T_{2S} , L_{3R} are for transmission line 4 while and L_{1Sm} , L_{1Rm} are for the main source. Moreover, Place $P_{L(6)}$, $P_{L(7)}$, $P_{L(9)}$, $P_{L(10)}$, $P_{L(11)}$, $P_{L(12)}$ represents relay R_1 and R_2 in figure 2 network as the secondary backup protection for relay R_7 , R_8 , R_9 , R_{10} and R_{11} . Similarly, the first, second and third backup protections in the model has been displayed in figure 4 for $P_{L(13)}$ and $P_{L(14)}$. Places $P_{L(3)}$, $P_{L(4)}$, $P_{L(5)}$ and $P_{L(8)}$ have no physical reality applied only as auxiliary places in accordance with the rules of Petri nets. The place of Line₂ specifies the fault in transmission line 2.

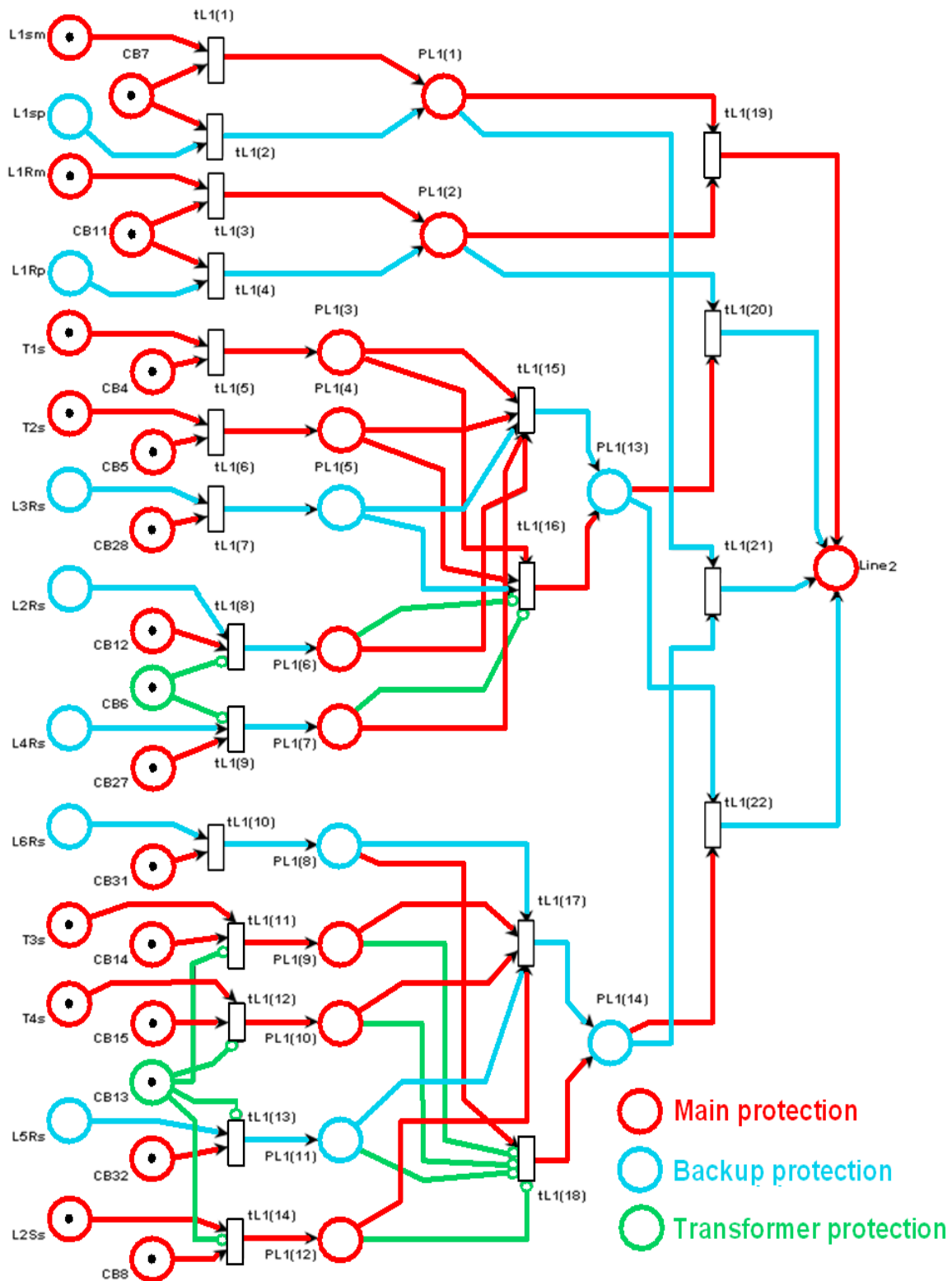


Figure 4: The petri net model for relay coordination study in power transmission line 2 of the 30 bus power transmission network

Furthermore, transitions $t_{L1(15)}$, $t_{L1(16)}$ and $t_{L1(18)}$ have no physical reality applied only for communication between places in accordance with the Petri net rules. In the same way, such a model can be improved for each segment of

the power transmission network where the faulted section can be detected through the information on status of protective elements as shown in figures 5 and figure 6.

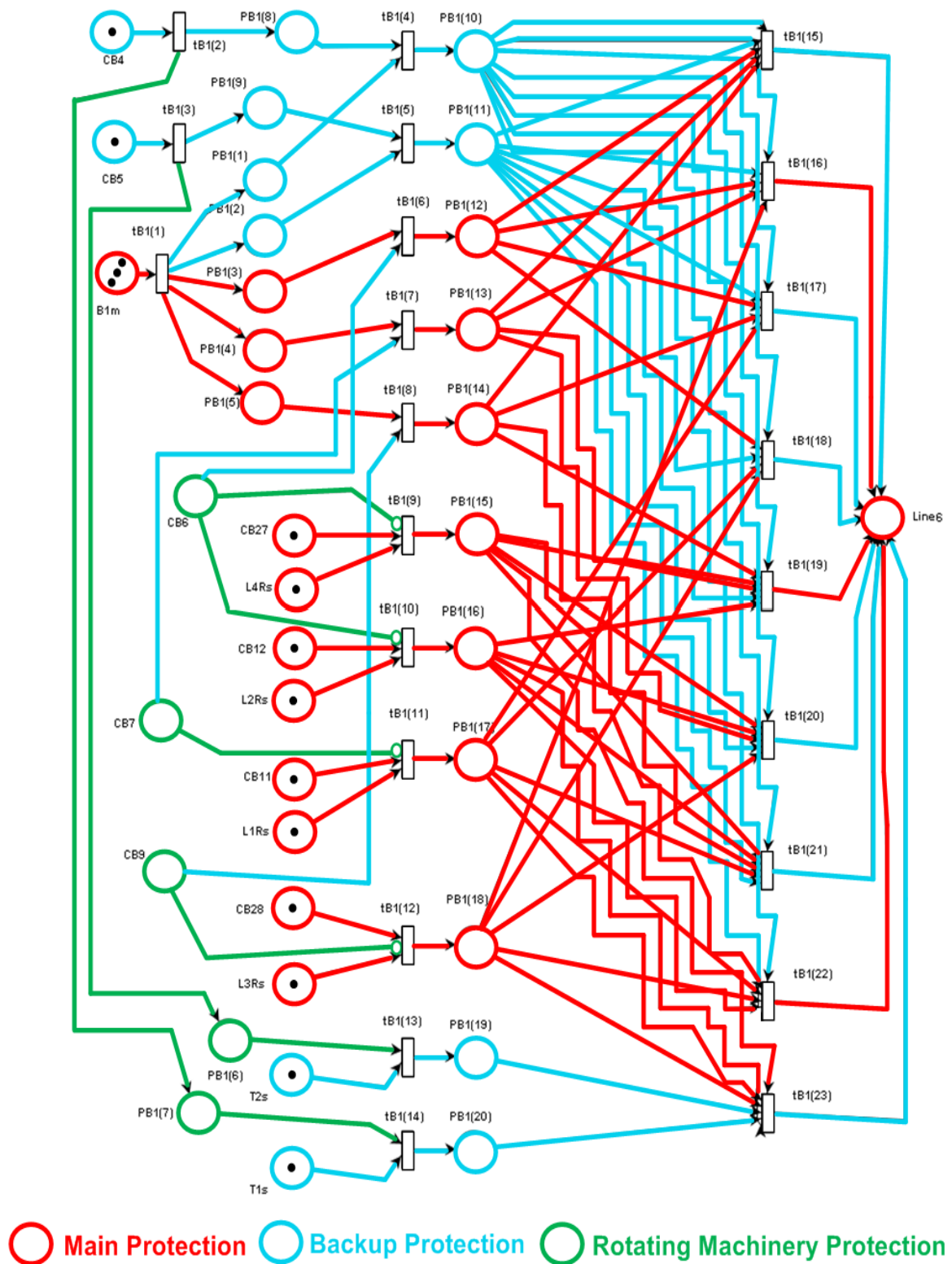


Figure 5: The petri net model for relay coordination study in power transmission line 6 of the 30 bus power transmission network

Since the penetration of REG into the 30-bus power transmission network under study is extremely high, it is likely to face protection disharmony [4], [9] which

should be considered in estimating the relay coordination strategy.

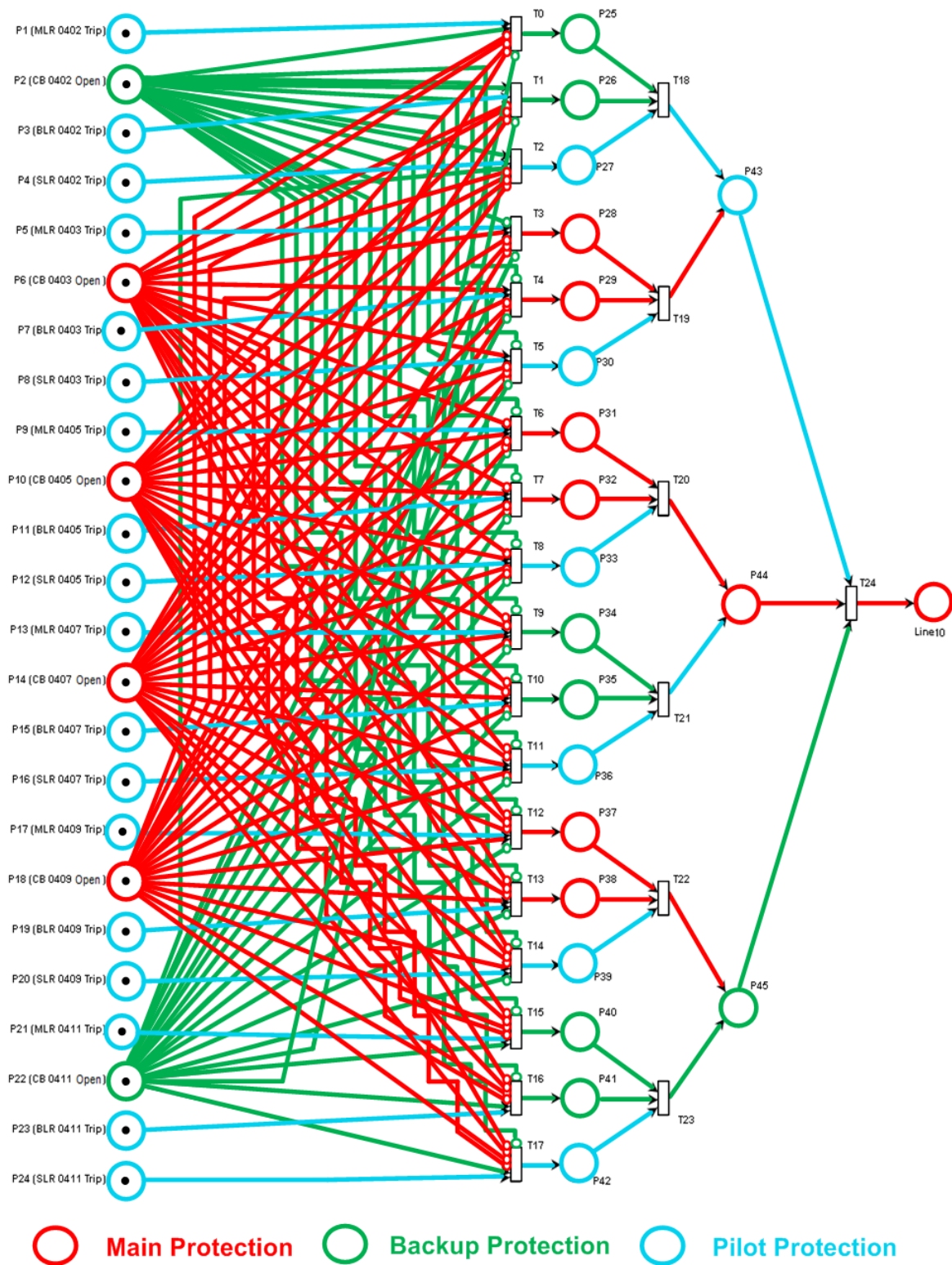


Figure 6: The petri net model for relay coordination study in power transmission line 10 of the 30 bus power transmission network

In these models, the PQ measurements were used at the REG places and power transmission substations in order to measure the voltage of sources. The method presented in [23] was employed to change their angles, which both

identified the type of fault and determined whether there was fault between the two sources. As such, the maximum angle change belongs to the two sources between which the fault is detected. In this procedure, the

input information to the Petri net model can be corrected through such data, i.e. the status of elements in contradiction with the above detection will be eliminated from the model inputs or incomplete input information will be completed. Here, the Phase Angles Change (PAC) for voltages of REGs and the main source is calculated based on the methodology presented in [24]. In this method, the PQ measurement at the beginning of the bus connection at each of the power supplies was applied to determine the voltage of these resources, thereby to measure the voltage waveform through conversion of Fast Fourier Transform (FFT) into PAC. The voltage of resources will be zero as soon as the PAC fault occurs [25]. In other words, the closer the fault to the power supplies the higher the PAC. Therefore, the fault zone between the resources can be specified.

4. NUMERICAL ANALYSIS RESULTS

For the relay coordination applications, the following three scenarios are considered for the power transmission network based on REGs:

- A single line phase fault (phase B to ground) occurred on power transmission line 2.
- Three line phase fault occurred at power transmission line 6.
- Two line phase fault (A-C) occurred on power transmission line 10.

In the first scenario, the fault current is 1630 A. The current passing through relay CB₆, CB₇, CB₈, CB₁₂, CB₂₇ and CB₃₂ connected to the beginning of power transmission line 2 belonging to the G₁ and G₂ in the fault current feed is 876 A. The share of G₃, G₄, G₅ and G₆ from the fault current feed is 473 A. Since the regulating current of relay CB₇ is 1000 A, it will not respond to the above fault. Furthermore, the status information of t_{L1}(1), t_{L1}(2), t_{L1}(8), t_{L1}(9), t_{L1}(13) and t_{L1}(14) were received through power transmission automation. According to [26], relay CB₁₁ and CB₃₁ was specified by index T as the secondary backup protection, relays L_{1Rm} and L_{1Rp} were specified by index S as the secondary backup protections, while relay L_{6Rs} was the main protection. It is assumed that protective coordination has not been fully fulfilled or it was impossible due to high penetration of REGs to fulfill the full coordination. According to the rules of protection configuration, the synchronization petri net model in power system for fault diagnosis is built and shown in figure 7, 8 and 9.

Figure 7 shows the petri net model of block transformer protection of power transmission line 2, which represents the faulty section of that block as CB₁₂, CB₆, CB₂₇, CB₁₄, CB₁₅, CB₃₂, CB₁₃ and CB₈. Places T_{3S}, T_{4S} and L_{2S5} are dedicated to a protective relays group for transformer

protection as described previously. Places L_{1Sm}, CB₇, L_{1Rm}, CB₁₁, T_{1S}, CB₄, T_{2S}, CB₅ and CB₂₈ are the corresponding circuit breakers for the section of the block transformer protection unit. Places L_{1Sp}, L_{1Rp}, L_{3Rs}, L_{2Rs}, L_{4Rs}, L_{6Rs} and L_{5Rs}, are virtual nodes and have no physical meaning. This meaning the transformer protection unit or other section is faulty when a one of its own protective relays and other sections protective relays operates with the corresponding circuit breakers together.

Figure 8 shows the petri net model of block rotating machinery protection of power transmission line 6, which represents the faulty section of that block as B_{1m}, CB₂₇, L_{4Rs}, CB₁₂, L_{2Rs}, CB₁₁, L_{1Rs}, CB₂₈ and L_{3Rs}. Places CB₆, CB₇ and CB₉ are dedicated to a protective relays group for rotating machinery protection as described previously. Places CB₄, CB₅, T_{1S} and T_{2S} are the corresponding circuit breakers for the section of the block rotating machinery protection unit. Places P_{B1(6)} and P_{B1(7)} are virtual nodes and have no physical meaning. This meaning the rotating machinery protection unit or other section is faulty when a one of its own protective relays and other sections protective relays operates with the corresponding circuit breakers together.

Figure 9 shows the petri net model of block pilot protection of power transmission line 10, which represents the faulty section of that block as P₂(CB₀₄₀₂), P₆(CB₀₄₀₃), P₁₀(CB₀₄₀₅), P₁₄(CB₀₄₀₇), P₁₈(CB₀₄₀₉) and P₂₂(CB₀₄₁₁). Places P₁(MLR₀₄₀₂), P₅(MLR₀₄₀₃), P₉(MLR₀₄₀₅), P₁₃(MLR₀₄₀₇), P₁₇(MLR₀₄₀₉) and P₂₁(MLR₀₄₁₁) are dedicated to a protective relays group for pilot protection as described previously. Places P₃(BLR₀₄₀₂), P₇(BLR₀₄₀₃), P₁₁(BLR₀₄₀₅), P₁₅(BLR₀₄₀₇), P₁₉(BLR₀₄₀₉), P₂₃(BLR₀₄₁₁), P₄(SLR₀₄₀₂), P₈(SLR₀₄₀₃), P₁₂(SLR₀₄₀₅), P₁₆(SLR₀₄₀₇), P₂₀(SLR₀₄₀₉) and P₂₄(SLR₀₄₁₁) are the corresponding circuit breakers for the section of the block pilot protection unit. Places P₂₇, P₃₀, P₃₃, P₃₆, P₃₉ and P₄₂ are virtual nodes and have no physical meaning. This meaning the pilot protection unit or other section is faulty when a one of its own protective relays and other sections protective relays operates with the corresponding circuit breakers together.

The initial token distribution is confirmed according to the received information from SCADA system in the control room. After finishing initial token distribution, the transition matching the condition will be fired. The token will be redistributed in the petri net graph after a series firing of transition until no transition can be fired, and then, the petri net graph reaches the stable status. The fault section can be directly obtained from the petri net graph at that time. The criterion rule is as follows; if there are tokens in place, then that node is the faulted section. Table 1 shows Phase Angle Changes (PACs) for three scenarios in power transmission network.

Table 1: Phase Angle Changes (PACs) for three scenarios in power transmission network

Scenario Number	PACs (rad)	PACs (rad)	PACs (rad) C phase
	A phase	B phase	
I	-0.00038	-0.06518	-0.00464
	0.00416	-0.07123	0.00413
	0.00169	-0.06214	-0.00846
	0.00137	-0.06721	-0.00433
	-0.00083	-0.04162	-0.00564
	0.00046	-0.05211	-0.00287
II	-0.15541	-0.12414	-0.11562
	-0.18580	-0.13489	-0.13145
	-0.15412	-0.11735	-0.11132
	-0.15434	-0.11877	-0.10754
	-0.16417	-0.10792	-0.10982
	-0.09123	-0.00456	0.03463
III	-0.10165	-0.00212	0.03942
	-0.18541	-0.00163	0.10574
	-0.10463	-0.00084	-0.00017
	-0.09856	-0.00147	0.03719
	-0.17832	-0.00213	0.11434

According to table 1, the fault zone will fall between the source G₁ and G₂. Therefore, it can be concluded that one of the relays among CB₈, CB₁₂, CB₁₄, CB₁₅, CB₂₇ and CB₃₂ should have been activated with t_{L1} (8), t_{L1} (9), t_{L1} (11), t_{L1} (12), t_{L1} (13), t_{L1} (14) which failed. Now, applying the information received from the power transmission automation and the results of table 2 to the Petri net models of transmission line 2 will have output. It should be noted that the data in table 1 from figure 7 Petri net models, a token has been assumed in relay CB₇ specified as a star. Figure 7 displays the marking of Petri net model in Figure 4 based on the relay status information received from power transmission automation system and information in table 1.

In the Figure 7 model, transitions t_{L1} (8), t_{L1} (9), t_{L1} (11), t_{L1} (12), t_{L1} (13), t_{L1} (14), t_{L1} (15), t_{L1} (16), and t_{L1} (18) will be fired on the basis of the Petri net rules as places p_{L1} (6), p_{L1} (7), p_{L1} (9), p_{L1} (10), p_{L1} (11), p_{L1} (12), p_{L1} (13) and p_{L1} (14) will entail tokens. Then, transition t_{L1} (19) will fire marking the place of Line₂, Hence determining whether there is fault in power transmission line 2. Figure 8 shows the marking of Petri net model in figure 5 based on the relay status information received from power transmission automation system and information in table 1. Figure 9

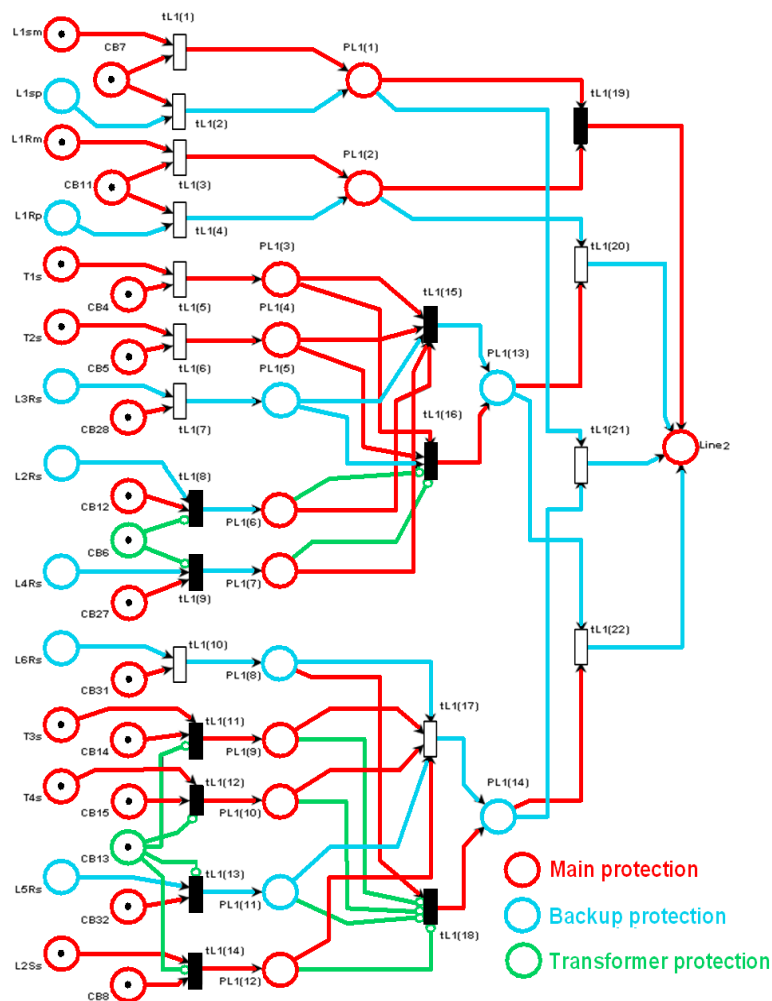


Figure 7: Marking of figure 4 petri net model for scenario I.

shows the marking of Petri model in figure 6 based on the relay status information received from power transmission automation system and information in table 1.

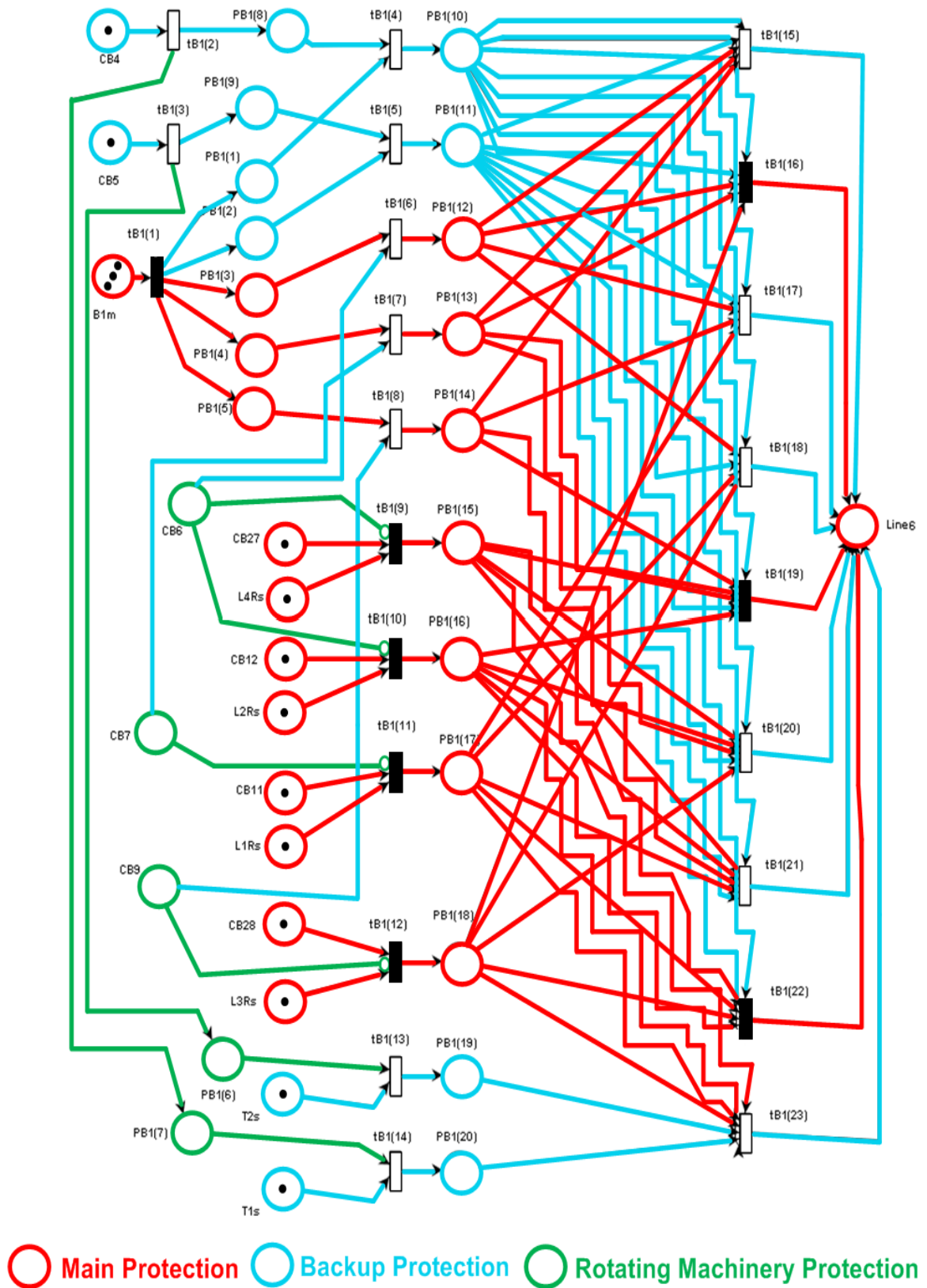


Figure 8: Marking of figure 5 petri net model for scenario II.

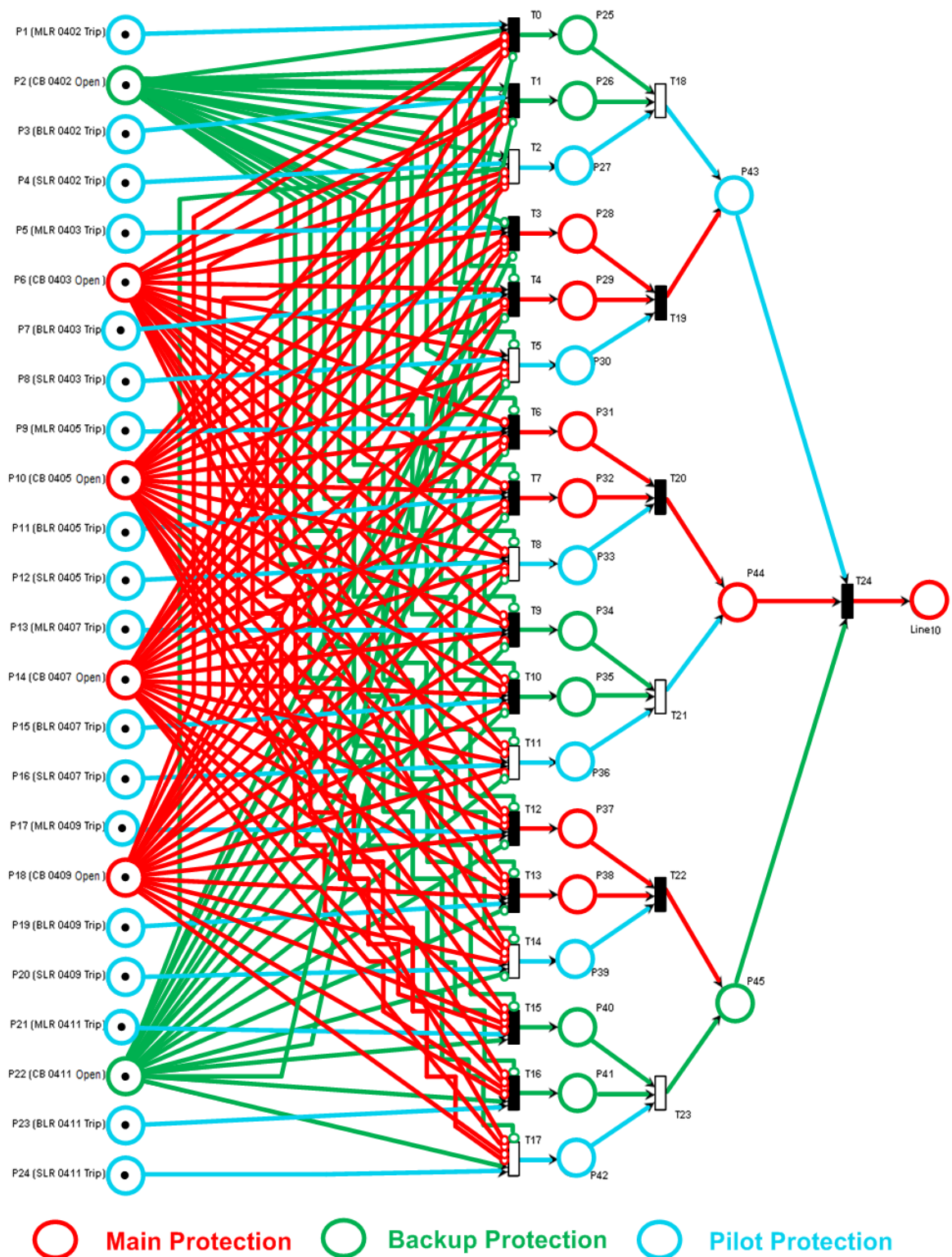


Figure 9: Marking of figure 6 petri net model for scenario III.

. In the second scenario, the fault current is 5393 A. The current passing through relay B_{1m} is 4885 A, of which 3012 A belongs to the network share, while the current passing through relays CB_{11} , CB_{12} , CB_{27} , CB_{28} , L_{1Rs} , L_{2Rs} , L_{3Rs} and L_{4Rs} are 1078 A which is more than the

regulated current and CB_{28} , L_{3Rs} will respond to the fault. Furthermore, the status information of $p_{B1(15)}$, $p_{B1(16)}$ and $p_{B1(18)}$ were received through power transmission automation. According to table 1, the faulted zone will fall between the Bus₁₁ and G₆. Now, applying the

information received from the power transmission automation and the results of table 1 to the Petri net models of lines Bus₁₁ and G₆, only the Petri net model of transmission line 6 will have output. It should be noted that the type of fault are specified by criteria $|PAC| > 0.05$ and data from table 1. In the third scenario, the fault current is 3155 A, to which relays P₂, P₆, P₁₀, P₁₄, P₁₈ and P₂₂ respond and the status information is received through the power transmission automation. According to table 1, the faulted zone will fall between the Bus₉ and Bus₁₀. Table 2 reports the operating of the protection relays, tripping circuit breakers and diagnosis of faulted sections in power transmission network for all scenarios.

operation of bus station bus differential relays P₃₇ and P₃₈. Following the operated relay many circuit breakers are tripped these circuit breakers are the first circuit breaker for block 1 (P₁₇ and P₁₈), block 2 (P₂₁ and P₂₂), block 3 (P₁₃ and P₁₄), block 4 (P₉ and P₁₀), block 5 (P₅ and P₆) and transmission line 10 (P₁ and P₂). The pilot protection of power transformer is operated and tripped the following circuit breakers; the first and second circuit breakers of block 1 and block 2. Applying petri net on fault diagnosis based on the final status of circuit breakers and the protective relays are easily used to determine the faulty sections in that scenario as well as a simple fault.

Table 2: Operating of the protection relays, tripping circuit breakers and diagnosis of faulted sections for three scenarios in power transmission network

Scenario	Operated Relay	Tripped CBs	Petri Net Diagnosis
I	P _{L1(1)} , P _{L1(3)} , P _{L1(4)} , P _{L1(8)}	CB ₆ , CB ₈ , CB ₁₂ , CB ₁₃ , CB ₁₄ , CB ₁₅ , CB ₂₇ , CB ₃₂	The faulted section is transmission line 2
II	P _{B1(1)} , P _{B1(2)} , P _{B1(3)} , P _{B1(4)} , P _{B1(5)} , P _{B1(15)} , P _{B1(16)} , P _{B1(17)} , P _{B1(18)}	B _{1m} , CB ₂₇ , L _{4Rs} , CB ₁₂ , L _{2Rs} , CB ₁₁ , L _{1Rs} , CB ₂₈ , L _{3Rs}	The faulted section is transmission line 6
III	P ₂₅ , P ₂₆ , P ₂₈ , P ₂₉ , P ₃₁ , P ₃₂ , P ₃₄ , P ₃₅ , P ₃₇ , P ₃₈ , P ₄₀ , P ₄₁	P ₁ , P ₂ , P ₅ , P ₆ , P ₉ , P ₁₀ , P ₁₃ , P ₁₄ , P ₁₇ , P ₁₈ , P ₂₁ , P ₂₂	The faulted section is transmission line 10

For scenario 1: Petri net fault diagnosis method directly determines the faulted section with transmission line 2 based on its own operated relay P_{L1(1)}, P_{L1(3)}, P_{L1(4)} and P_{L1(8)} which leads to trip the corresponding circuit breakers of that faulted transmission line 2 as; generation units' circuit breakers and the double-circuit breakers of the block transformer protection unit. (The first and second circuit breaker) The proposed method determines the faulted transformer although there are a lot of alarms and tripping signals received in the power station control room.

For scenario 2: A lot of alarms and tripping signals are received in the power generation station control room. These signals include the tripping signals such as operated protective relay P_{B1(1)}, P_{B1(2)}, P_{B1(3)}, P_{B1(4)}, P_{B1(5)}, P_{B1(15)}, P_{B1(16)}, P_{B1(17)} and P_{B1(18)}, alarm signals such as tripping the related circuit breakers as; B_{1m}, CB₂₇, L_{4Rs}, CB₁₂, L_{2Rs}, CB₁₁, L_{1Rs}, CB₂₈ and L_{3Rs}, and finally, a large number of events appear resulting of that fault. The operator needs to process these signals, although that information is so large that human ability to comprehend can easily be overwhelmed. Petri net solves this situation shortly and computes the faulted section with transmission line 6.

For scenario 3: This scenario is considered as a simulation of a multiple fault may be occurred in the power transmission line 10 and makes confusion to the operators due to a lot of information (events, tripping signals, alarm signals) need to be processed. This fault may cause the power transmission line 10 to outage which in turn leading to whole the power system to the breakdown. The fault occurred in bus station 9 by

5. CONCLUSIONS

The presented method allows dealing with power transmission network with high penetration of REGS that introduces problems such as losing coordination of protection devices with consequence false tripping. The presence of REGs in the power transmission network, especially under the extreme penetration of these resources, will most likely lead to protective disharmony or there will not be any possibility to perfectly maintain protective coordination. This important factor can inhibit the application of REG generations due to their economic and environmental advantages. In this paper, protection and relay coordination strategy was proposed through the Petri net models for determining the faulted section of the power transmission network in presence of REG. In this method, the Petri net models were adopted for fast processing of information received from power transmission automation. The effectiveness of the method has been demonstrated by means of critical scenarios study related to protection systems and REGs.

In these scenarios study, in presence of a three phase fault, the loss of coordination in protection system is detected and the correct location of fault is obtained. In solving the problem of uncertainty facing to the information received from power transmission automation due to presence of REGs, it is recommended that active and reactive power measurements be employed at REGs and power transmission substations in order to determine the voltage of these generator resources and change their angles for detecting the type of fault and also whether there is any error occurred between the two generator resources. By results it's clear

that the proposed method can remove a lot of complexity in data analysis and allow managing little information while avoiding cascading failure in power protection system. In this procedure, the maximum voltage angle change between two generator resources will determine whether there is any fault, thus providing an opportunity to modify the input information to the Petri net model. Accordingly, the status of protection elements in contravention with the above detection can be eliminated from the model inputs or the incomplete received information can be completed.

REFERENCES

- [1] Brown, P.D., Lopes, J., Matos, M.A., "Optimization of pumped storage capacity in an isolated power system with large renewable penetration", *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2): 523-531, (2008).
- [2] Conti, S., "Analysis of distribution network protection issues in presence of dispersed generation", *Electrical Power System Research*, 79(1): 49-56, (2009).
- [3] Panwar, N.L., Kaushik, S.C., Kothari, S., "Role of renewable energy sources in environmental protection: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3): 1513-1524, (2011).
- [4] Simpson-Porco, John, W., Dörfler, F., Bullo, F., "Synchronization and power sharing for droop-controlled inverters in islanded microgrids", *Automatica*, 49(9): 2603-2611, (2013).
- [5] Balaguer, I.J., Lei, Q., Yang, S., Supatti, U., Peng, F.Z., "Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(1): 147-157, (2011).
- [6] Pamuk, N., Uyaroglu, Y., "Fault Section Estimation of Electric Energy Systems Using Petri Nets", *6th International Ege Energy Symposium and Exhibition (6th IEESE)*, 28-30 June, Izmir, Turkey, 608-616, (2012).
- [7] Pamuk, N., Uyaroglu, Y., "The Determination of Fault Sections on Energy Transmission Lines Using Fuzzy Petri Nets", *6th International Ege Energy Symposium and Exhibition (6th IEESE)*, 28-30 June, Izmir, Turkey, 617-625, (2012).
- [8] Kolla, S.R., Altman, S.D., "Artificial neural network based fault identification scheme implementation for a three-phase induction motor", *ISA Transactions*, 46(2): 261-266, (2007).
- [9] Gan, Z., Elangovan S., Liew A.C., "Microcontroller based overcurrent relay and directional overcurrent relay with ground fault protection", *Electric Power Systems Research*, 38(1): 11-17, (1996).
- [10] Petri, C.A., "Kommunikation mit Automaten. Bonn: Institut für Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM Nr. 3, Translation: Communication with Automata", *New York: Griffiss Air Force Base, Tech. Rep., RADC-TR-65-377*, 1(1): (1966).
- [11] Pamuk, N., Uyaroglu, Y., "Modeling of fault diagnosis in power systems using petri nets", *Elektronika ir Elektrotechnika*, 118(2): 63-66, (2012).
- [12] Moore, K.E., Güngör, A., Gupta, S.M., "Petri net approach to disassembly process planning for products with complex and/or precedence relationships", *European Journal of Operational Research*, 135(1): 428-449, (2001).
- [13] Lo, K.L., Ng, H.S., Grant, D.M., Trecat, J., "Extended petri net models for fault diagnosis for substation automation", *IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution*, 146(3): 229-234, (1999).
- [14] Korpeoglu, B.B., Yazici, A., "A fuzzy petri net model for intelligent databases". *Data & Knowledge Engineering*, 62(1): 219-247, (2007).
- [15] Bulanch, S., Brauchle, A., Pflleiderer, H.J., Kuceravsky, Z., "Design and implementation of discrete event control systems: a petri net based hardware approach", *Discrete Event Dynamic Systems Theory and Applications*, 12(3): 287-309, (2002).
- [16] Uzam, M., Jones, A.H., "Discrete event control systems design using automation petri nets and their ladder logic diagram implementations", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(10): 716-728, (1998).
- [17] Sun, Y., Jiang, H., Wang, D., "Fault synthetic recognition for an EHV transmission line using a group of neural network with a time-space property", *IEEE Proceedings of Generation, Transmission and Distributions*, 145(3): 265-270, (1998).
- [18] Pamuk, N., "Usage and Applications of Petri Nets in Electric Power System Protection Analysis", *Sakarya University, Institute of Natural Sciences, Department of Electric Electronic Engineering, Ph.D. Thesis*, Sakarya, Turkey, (2012).
- [19] Ramos, G., Sanchez, J.L., Torres, A., Rios, M.A., "Power systems security evaluation using petri nets", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(1), 316-322, (2010).
- [20] Calderaro, V., Hadjicostis, C.N., Piccolo, A., Siano, P., "Failure identification in smart grids based on petri net modeling", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(10): 4613-4623, (2011).
- [21] Calderaro, V., Galdi, V., Piccolo, A., Siano, P., "A Petri net based protection monitoring system for distribution networks with distributed generation", *Electric Power Systems Research*, 79(9): 1300-1307, (2009).
- [22] Brahma, S.M., "Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(3): 1545-1553, (2011).
- [23] Calderaro, V., Piccolo, A., Galdi, V., Siano, P.V., "Identifying Fault Location in Distribution Systems with High Distributed Generation Penetration", *IEEE AFRICON'09*, 23-25 September, Nairobi, Kenya, 1-6, (2009).
- [24] Hsieh, F.S., Lin, J.B., "A self-adaptation scheme for workflow management in multi-agent systems", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(1): 131-148, (2016).
- [25] Guochen, C., Han L., Zhu B., "Realization method of adaptive protection system with distributed structure for large-scale transmission network", *Automation of Electric Power Systems*, 12(1): 13-26, (2015).
- [26] Mansour, M.M., Wahab, M.A., Soliman, W.M., "Petri nets for fault diagnosis of large power generation station", *Ain Shams Engineering Journal*, 4(4): 831-842, (2013).

Titreşim ve Kesme Kuvveti Esaslı Takım Aşınmasının Bulanık Mantıkla İzlenmesi ve Tahmini

Aydin SALIMIASL¹, Mohammad RAFIGHI^{2*}

¹Payame Noor Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, , Tabriz, İran

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye.

(Geliş/Received : 04.06.2016 ; Kabul/Accepted : 11.10.2016)

ÖZ

Talaş kaldırma sürecinde, izlenmeyen takım aşınması parça bozukluğunu ve hurda sayısını artırmakla beraber, aynı zamanda takımın kırılmasına ve pahalı CNC takım tezgâhlarında yüksek hasarlara sebep olmaktadır. Aşınma oranına dayalı, takıma verilmesi gereken takım aşınma telafi değerlerinin doğru tespiti, takımın oluşum aşınmanın iş parçasının boyutlarında ve yüzey kalitesinde kabul edilemez bir sınıra geleceği anın bilinmesi ve kırılma olmadan önce yeni bir takım ile değiştirilmesi için talaş kaldırma sürecini izleyen bir otomasyon takip sistemi gereklilik olmuştur. Bu çalışmada, talaşlı imalatta bir otomasyon sistemi kurmak ve yan yüzey takım aşınma miktarını anlık tahmin etmek için kuvvet ve titreşim algılayıcıları kullanılarak bir bulanık mantık sistemi tasarlanmıştır. Sistemin kurulması için, talaş kaldırma parametreleri, kesme kuvveti ve titreşim değişkenleri girdi olarak ve takım aşınma miktarı çıktı olarak bulanık mantık sistemine verilmiştir. Taguchi metodu kullanılarak deney tasarımı yapılmıştır. Ölçülen ve tahmin edilen sonuçlar, takım aşınmasının tespiti için, bulanık mantık metodunun güvenilir olduğunu göstermiştir.

Anahtar Sözcükler: Takım Aşınmasının İzlenmesi, Kesme Kuvveti, Takım Titreşimi, Bulanık Mantık.

Monitoring and Estimating of Vibration and Cutting Force Based Tool Wear via Fuzzy Logic

ABSTRACT

During the chip removal process, the unmonitored tool wear not only increase the number of scraped parts but also causes the untimely tool breakage and the high costly damage on the expensive CNC machine tools. For applying the correct tool offset on the cutting tool based on the wear ratios, for determining the critical tool wear rates influencing on the work piece dimensions and surface quality and for replacing a new tool with a worn one before tool breakage during the machining operations, an automation system is required for monitoring the operation accurately. For establishing the automation system for online monitoring and estimating the tool wear in this research, a fuzzy logic system is designed by using of cutting force and vibration sensors. Cutting parameters, cutting forces and vibration variables are applied as input and the wear rate as output data to the fuzzy logic for constructing the system. Taguchi method is applied to design an experimental table for carrying out the tests. The measured and estimated results confirm the reliability of the fuzzy logic method for tool wear estimation.

Keywords: Tool Wear Monitoring, Cutting Force, Tool Vibration, Fuzzy Logic.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Takım aşınmasını izlemek için genelde dolaysız ve dolaylı olmak üzere iki yöntem kullanılır [1]. Dolaysız yöntemde takım aşınması, takım üzerinden ölçülmekte ve talaş kaldırma işlemini durdurmak gerekmektedir. Dolaylı yöntemde, takım aşınmasının elde edilmesi için onunla ilişkili olan ve sürekli değişen başka bir değişken (kuvvet, titreşim vb.) ölçülür ve bir katsayı ile çarpıldığında aşınma miktarı elde edilir [2, 3]. Bu yöntemde motor akımı, kuvvet ve moment, titreşim, akustik ve yüzey pürüzlülüğü algılayıcı yardımıyla farklı zamanlarda takımın oluşum aşınma miktarlarını ölçüp ve çeşitli analiz ve tahmin yöntemleri kullanılarak istenilen zaman aralığındaki aşınma miktarı belirlenmiştir [3, 4]. Bu yöntemler, istatistiksel yöntemlerden başlayarak bulanık mantık, yapay sinir ağları, genetik algoritma gibi modern ve güncel prosedürlere dayanmaktadır. Yapay

zekâ kullanılarak süreç modelleme işlemi, çeşitli araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiş ve yapılan çok sayıda araştırmaya rağmen, takım aşınmasının izlenmesi için henüz sanayide pratik bir yöntem bulunamamıştır [5, 6]. Talaşlı imalatta takımın anlık izlenmesi, talaş kaldırma işlemlerinin optimize edilmesi, kontrolü ve tahmin edilmesi için çalışmalar hala sürdürülmektedir.

Talaşlı imalatta, kesicide oluşan kuvvet, kesme işlemini en iyi yansıtan değişkenlerden biri olarak kabul edilmiştir [7, 8]. Bu yüzden, kesme kuvvetini izleme prosedürleri takımın durumunu [9-12] ve parça doğruluğunu, sıklıkla teşhis ve tahmin etmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [13-16]. Kesme operasyonu, malzmeden talaş kaldırmak için gereken miktarda kuvvet ihtiyacını doğurmaktadır. Analitik modellerin doğrulamasında, kesicide oluşan kuvvetlerin talaş kaldırma süresince izlenmesi ve takım kırılmasının önceden belirlenmesi için çeşitli yöntemlerin araştırmacılarla önerildiği görülmektedir [17].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: m.rafighi@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 111-120

Kesici takımında oluşan titreşim değişkenlerinin ölçülmesi başka bir yöntem olarak, aşınmanın izlenmesi ve tahmin etmesi için araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir [18-20]. Talaş kaldırma süresince ortaya çıkan titreşimler iki gruba ayrılmaktadır. (i) kesme sürecine bağımlı olan titreşimler ve (ii) kesme sürecinden bağımsız olan titreşimler. Talaş kaldırma işleminden kaynaklanan takım aşınması, takımın titreşimine sebep olduğunda bu titreşim türüne kesme sürecine bağımlı olan titreşimler denir. Dolayısıyla takım aşınmasının izlenmesi, kesme sürecine bağlı olan titreşimlerin kaydedilmesini ve izlenmesini beraberinde gerektirmektedir. Takımın aşınması, kesme süresince artar ve bu artışlar titreşimin genliğinin artmasına yol açar [18].

Bu çalışmada, tornalama işlemlerinde takım aşınmasının tahmini prosedüründe değişkenler olmak üzere kesme kuvveti değişimi ve takım titreşiminin genliği kaydedilmiştir. Tahmin sistemi kurmak için bulanık mantık yönteminden faydalanılmıştır. Yan yüzey aşınması, takım ömrü kriteri olarak kullanılmış ve ISO 3685 standardına göre sırasıyla 0 ve 0,3 mm aralıklarına bölünmüştür. Talaş kaldırma parametreleri, kesme kuvveti ve titreşim değişkenleri girdi olarak bulanık mantık sistemine verilmiş ve takım aşınması çıktı olarak sistemden elde edilmiştir. Çalışmada, tahmin sistemi geliştirmek için MATLAB yazılımının bulanık mantık araç kutusu kullanılmıştır. Bulanık mantık sisteminin tasarlanması için, kesme hızı (V), kesme derinliği (d), ilerleme (f), bileşke kesici kuvveti (F) ve titreşim genliği (T) girdi olarak ve takım aşınması çıktı olarak dikkate alınmıştır. Verileri değerlendiren bir simülasyon blok diyagramı yapılmıştır. Sisteme, algılayıcılardan alınan

kesme kuvveti ve titreşim değerleri girdi olarak verildiğinde, aşınma miktarı, anlık değişme uyarısı olarak değişme göstermektedir. Ölçülen ve tahmin edilen değerler, bulanık mantık metodunun takım aşınmasının tahmini için kullanılmasının güvenilir olduğunu göstermiştir.

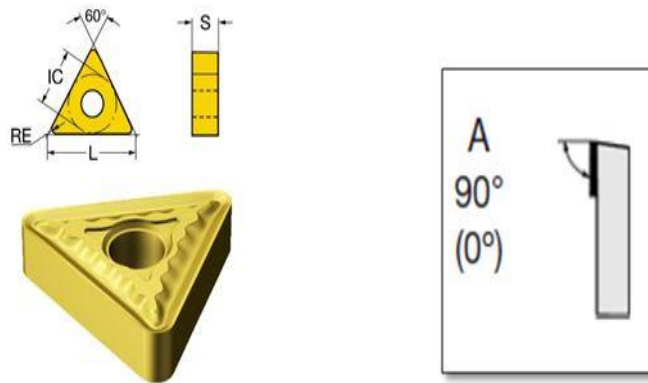
2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada, kesici kuvvet ve titreşim genliği kullanılarak takım aşınma miktarının izlenmesi ve tahmini yapılmıştır. Deneylerin yapılması için FANUK kontrol ünitesine ve 30-3500 rpm aralıkları devir sayısına sahip olan Johnford TC-35 CNC takım tezgâhı seçilmiştir. Bu tezgâh aynı zamanda 250 mm bağlama aynası boyutuna sahiptir. Talaş kaldırmak için Sandvik-Coromant kaplamasız uç (TNMG 1604-QM H13) ve TIZIT Simple (CTANR 2525M16) markalı bir takım tutucu kullanılmıştır (Şekil 1). Deneylerde tercih edilen kesici takımın geometrik özellikleri Çizelge 1'de ve Şekil 1'de gösterilmiştir

Deneyleri yapmak için $\varnothing 100 \times 1000$ mm boyutunda olan bir SAE 1050 malzemeden silindirik ham iş parçası hazırlanmıştır. İş parçasının kimyasal bileşimi Çizelge 2'de verilmiştir. Talaş kaldırma operasyonu için kullanılan parametreler, ISO 3685 standardına göre hazırlanmıştır (Çizelge 3). Kesici takımın yanak aşınması miktarının ölçülmesi için bir Dino Capture 2 (AD7013MTL) dijital mikroskobu kullanılmıştır. Bu cihazın ayırma özelliği 2592x1944 piksel ve büyütme boyu 10x-90x aralıklarındadır (Şekil 2).

Çizelge 1. Kesici takımın geometrik özellikleri (The geometric properties of cutting tools)

Kesici uç	SANDVIK TNMG 16 04 04-QM H13A				
Geometrik değerleri	Kesici uç Kalınlığı (S)	Teğet Daire çapı (IC)	Köşe Yarıçapı (RE)	Kesici Uç ağırlığı (WT)	Kesme Kenarı uzunluğu (L)
	4,762 mm	9,525 mm	0,4 mm	0,007 kg	16,497 mm



Şekil 1. Kesici uç geometrisi ve takım tutucusu (Cutting insert geometry and tool holder)

Çizelge 2. İş parçasının kimyasal bileşimi (Chemical information of the workpiece)

İş parçası	SAE1050 (AISI 1050)							
Kimyasal Bileşimi (%)	C	Si	Mn	Cr	P	S	Mo	N
	0,49	0,19	0,65	0,03	0,01	0,005	0,01	0,08

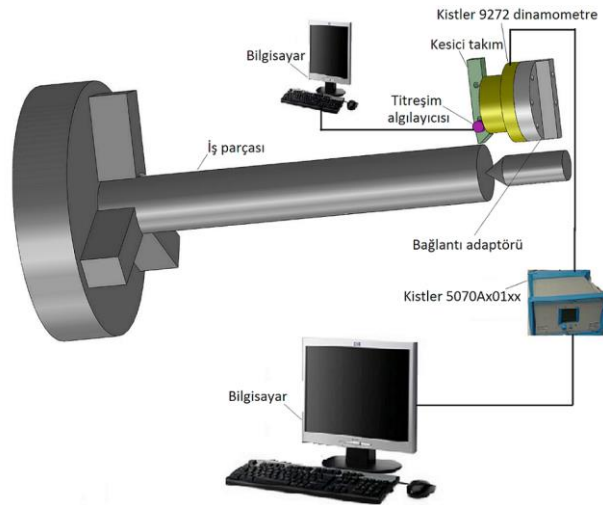
Çizelge 3. Kesme parametreleri (Cutting parameters)

Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)	Yanak aşınması aralıkları (mm)
100	0,18	1	0,0-0,1 mm, 0,1-0,2 mm ve 0,2-0,3 mm
125	0,23	1,5	
150	0,28	2	

**Şekil 3.** Takım yanak aşınmasının ölçmesi için kullanılan mikroskop (Microscope which is used to measure tool flank wear)

Üç yönde, F_c (Esas kesme kuvveti), F_t (İlerleme kuvveti) ve F_r (radyal kuvveti) kuvvet miktarlarının ölçülmesi için, Kistler 9272 4-bileşenli dinamometre ve Kistler 5070Ax01xx yükselteç seçilmiş ve veriler bilgisayara kaydedilmiştir. Aynı zamanda kesici takım üzerinde titreşim genliğini ölçmek için TV300 markalı titreşim ölçer algılayıcısı kullanılmıştır. Titreşim algılayıcısı, titreşimin miktarını değerlendirme amacıyla, ivme, hız ve yer değiştirme olmak üzere, üç farklı değişkeni ölçebilmektedir. Kullanılan algılayıcı, bu değişkenlerin

karekök ortalamalarını vermektedir. Araştırma kapsamında ivme değişkeninin karekök ortalaması 10 Hz - 10 KHz frekans aralıklarında ölçülmüştür. Titreşim algılayıcısından alınan veriler veri görüntüleme yazılımında analiz edilmiş ve zamana bağlı grafikler çıkarılmıştır. Takım aşınma miktarlarının tahmini, ISO 3685 standardı göz önüne alarak 0-0,3 mm aralığında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te deneylerin yapılması için kurulan deney düzeneğini gösterilmektedir.

**Şekil 2.** Deney düzeneği (Test setup)

2.1. Deneysel Prosedürü (Test Procedure)

Yanak aşınmasının tahmin sistemini kurmak için, yeni, orta aşınmış, çok aşınmış ve aşınmış takım aralıkları sırasıyla: 0-0,1-0,2-0,3 mm olarak derecelendirilmiştir. Bu çalışmada ISO 3685 standardına göre V_b değeri takımın ömrünün ve takımın değiştirilmesinin kriteri olarak dikkate alınmıştır. Çalışma esnasında ölçülen bir kesici uç yanak aşınması Şekil 4a'da verilmiştir. Daha iyi bir deney düzeneğinin kurulması için tüm deneyler üç kez tekrar edilmiştir.

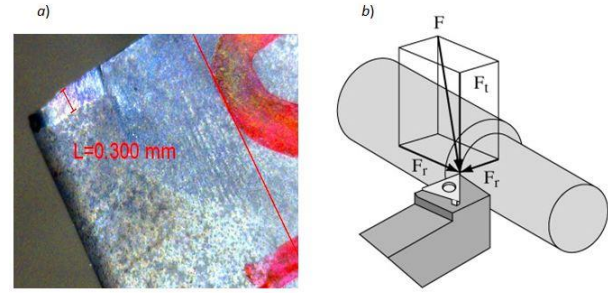
Deneylerin yapılması için farklı kesme parametreleri ve Taguchi deney tasarımı metodunda, JMP programı kullanılarak bir L9 deney düzeneği hazırlanmıştır. Taguchi metodu sonrasında elde edilen 9 deney tasarımı Çizelge 4'te gösterilmiştir. Aşınma aralıklarını kullanarak, talaş kaldırma boyunca kesme kuvvetini ve titreşim miktarını ölçmek için 36 (4x9) deney sayısı yapılmıştır. Talaş kaldırma boyunca 3 farklı kuvvet meydana gelmekte (Şekil 4b.) ve güvenilir bir izleme sistemi kurmak için meydana gelen 3 kuvvetin bileşkesinin kullanılması gerekmektedir. Çizelge 5'te gösterildiği gibi 3 faktör kullanılarak JMP programında elde edilen genel L9 ortogonal deney düzeneği verilmiştir.

Çizelge 4. L9 deney düzeneği (L9 test setup)

Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)
100	0,18	1
125	0,28	1
150	0,23	1
100	0,23	1,5
125	0,18	1,5
150	0,28	1,5
100	0,28	2
125	0,23	2
150	0,18	2

Çizelge 5. 3 faktör kullanılarak JMP programında elde edilen genel L9 ortogonal deney düzeneği (The general L9 orthogonal test setup obtained in the JMP software by using of 3 factors)

Deney numarası	Sütun (Faktörler)		
	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2



Şekil 4. a: Ölçülen bir yanak aşınması örneği, b: Takımın ucunda oluşan kuvvetler (a: An example of a measured flank wear, b: The forces generated at the tip of tool)

Bileşke kuvvetinin hesaplanan miktarı aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

$$F \sqrt{F_c^2 + F_t^2 + F_r^2} \quad (1)$$

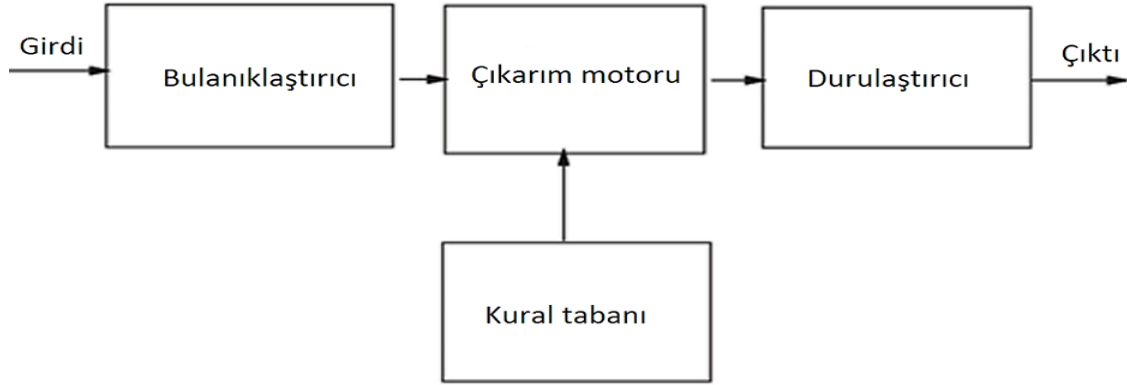
Titreşim miktarının tespiti için aşınma aralıklarında ve belirtilen frekans aralıklarında ivme dalgalarının genliği ölçülmüştür.

2.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic)

Bulanık mantık kavramı ilk kez, 1965 yılında California Berkeley Üniversitesinden Zadeh'in bu konu üzerinde ilk makalelerinin yayınlamasıyla duyulmuştur [21]. O tarihten sonra önemi gittikçe artarak günümüze kadar gelen bulanık mantık, belirsizliklerin anlatımı ve belirsizliklerle çalışılabilmesi için kurulmuş katı bir matematik düzen olarak tanımlanabilir. Bulanık mantık kavramı, insanların kesin olmayan ifadelerle düşünme yeteneğiyle örtüşen mantık sistemidir. Başka bir deyişle, bulanık mantık soğuk-sıcak, hızlı-yavaş, yüksek-alçak gibi ikili değişkenlerden oluşan keskin yorumu, az soğuk-az sıcak, az hızlı-az yavaş, az yüksek-az alçak gibi esnek nitelilerle gerçek dünyaya dönüştürme aracı olarak dikkate alınır [21, 22].

2.2.1. Bulanık çıkarım sistemi (Fuzzy inference system)

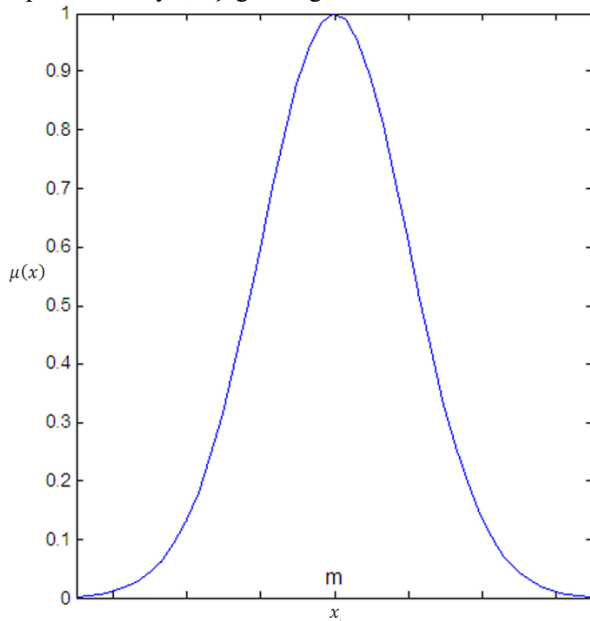
Bulanık çıkarım, bulanık mantık kullanarak girdilerden çıktı elde etme işlemidir. Bulanık çıkarım bulanık üyelik fonksiyonlarının, üyelik değerlerinin, IF-THEN kurallarının, bulanık mantık operatörlerinin kullanıldığı bir yapılaşma sürecidir. Genelde, Mamdani ve Sugeno olarak adlandırılan, iki tür çıkarım metodu kullanılmaktadır ve sonuç belirleme işleminde kısmen birbirlerinden farklı olur. Bu çalışma kapsamında da dikkate alınan Mamdani çıkarım metodu literatürde de tercih edilen metod olmuştur [23]. Bulanık çıkarım sistemi, genel itibarıyla Şekil 5'te gösterildiği gibi dört kategoriden oluşmaktadır. Bunlar; bulanıklaştırma, çıkarım motoru, kural tabanı ve durulaştırma olarak ifade edilmektedir



Şekil 5. Bulanık çıkarım sisteminin genel modeli (General model of fuzzy inference system)

2.2.2. Bulanık mantık modellemesi (Fuzzy logic modeling)

Bir bulanık mantık modeli oluşturmak için, yukarıda alt başlıklarda verilen bütün adımların sırasıyla atılması gerekmektedir. Çalışmada girdi ve çıktı verilerinin durulaştırılması için, MATLAB paketinde bulunan bütün üyelik fonksiyonları denenmiştir ve çalışmanın amacına en uygunu seçilmiştir. Diğerlerine nazaran Gauss üyelik fonksiyonu en güvenilir sonucu vermiştir. Gauss esaslı üyelik fonksiyonu, Şekil 6'da görüldüğü gibi x ekseninde bir merkezi m miktarıyla ve $k > 0$ bir standart sapma miktarıyla, aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.



Şekil 6. Gauss üyelik fonksiyonu (Gaussian membership function)

$$\mu(x) = e^{-\frac{(x-m)^2}{2k^2}} \quad (2)$$

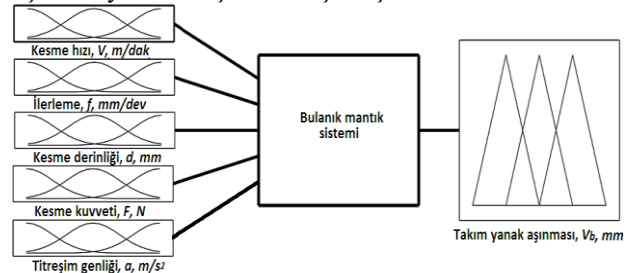
Girdi ve çıktı değişkenleri için seçilen bulanık kümeleri göz önüne alınacak şekilde, birkaç örnek kural aşağıda verilmiştir

- If ilerleme is f_1 and kesme derinliği is d_1 and kesme hızı is V_1 and bileşke kesme kuvveti is F_1 and titreşim genliği is a_1 then takım aşınması is V_{b1}
- If ilerleme is f_2 and kesme derinliği is d_2 and kesme hızı is V_2 and kesme kuvveti is F_2 and titreşim genliği is a_2 then takım aşınması is V_{b2}
- If ilerleme is f_3 and kesme derinliği is d_3 and kesme hızı is V_3 and kesme kuvveti is F_3 and titreşim genliği is a_3 then takım aşınması is V_{b3}

Tüm kurallar yazıldıktan sonra, bulanık mantık sisteminde sonuçlar elde edilmiştir.

2.2.3. Bulanık mantık tahmin sistemi (Fuzzy logic estimation system)

Bu çalışmada, MATLAB yazılımının bulanık mantık araç kutusu tahmin edici sistemin tasarımı için kullanılmıştır. Bulanık mantık sistemini kurmak için, kesme hızı (V), kesme derinliği (d), ilerleme (f), bileşke kesici kuvvet (F) ve titreşim genliği (a) girdi olarak ve takım aşınması çıktı olarak bulanık mantık sisteminin tasarlanmasında dikkate alınmıştır. MAMDANI metodunun bulanık sistem anlatımı Şekil 7'de verilmiştir. Kesme parametrelerinin sayısı üç ve her birisi üçer seviye olacak şekilde seçilmiştir.



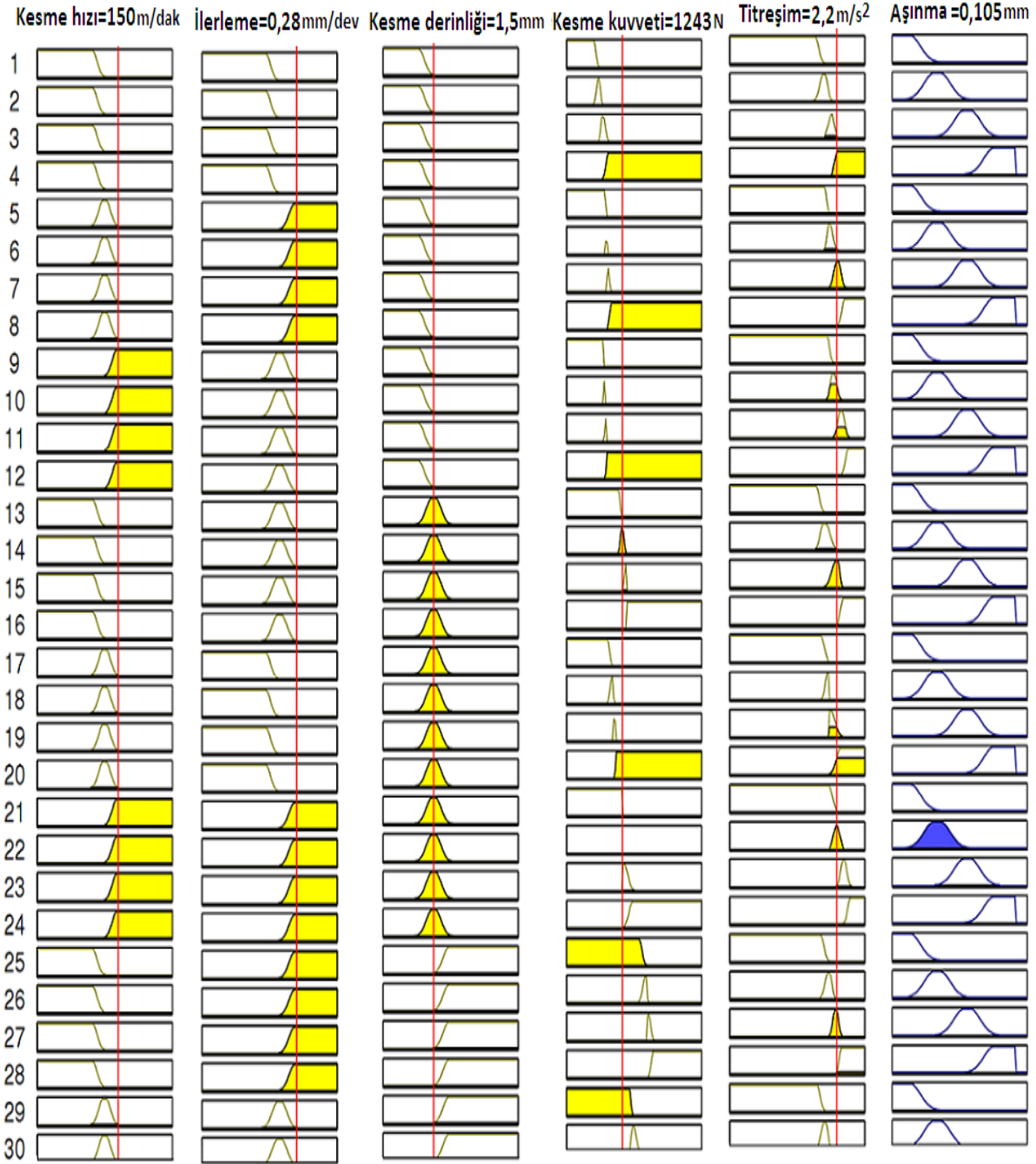
Şekil 7. Takım aşınmasının tahmini için tasarlanan bulanık mantık modeli (Fuzzy logic model designed for estimation of tool wear)

Tasarlanan sistemde, kesme parametrelerinin bulanıklaştırılması için, üç bulanık kümesi kullanılmıştır. Kesme kuvveti ve titreşim genliği için, deneylerin sayısına uygun olacak 36 bulanık kümesi seçilmiştir. Diğer taraftan, seçilen 0 - 0,1 - 0,2 ve 0,3 mm aşınma

aralıkları için dört bulanık kümesi kullanılmıştır. Deneylere göre, çıkarım motorunu oluşturmak için kurallar yazılmıştır. Bulanık mantık çıkarım sistemi Şekil 8'de görülmektedir. Girdi miktarları sisteme girildiğinde, takım aşınması tahmin edilmektedir. Bulanık sisteminin girdi bölümünde kesme parametrelerinin, kesme

koşullarda çalışacağını belirlemektedir. Bir başka ifadeyle, sabit kesme parametreleri seçildiğinde, talaş kaldırma süresince takım aşınması, kaynaklı kesme kuvveti ve titreşim değerleri artmaktadır.

Takım aşınma sürecinin izlenilmesi için, MATLAB programında bir simülasyon blok diyagramında



Şekil 8. Aşınma tahmini için bulanık mantık çıkarım sistemi (Fuzzy logic inference system for wear estimation)

kuvvetinin ve titreşim genliğinin değiştirildiğinde aşınma miktarının doğru değeri otomatik olarak değişir. Girdilerin arasında, aşınmayı tahmin etmek için kesme kuvveti ve titreşim genliği değişkenleri en etkin role sahiptirler. Kesme parametreleri ise, sistemin hangi

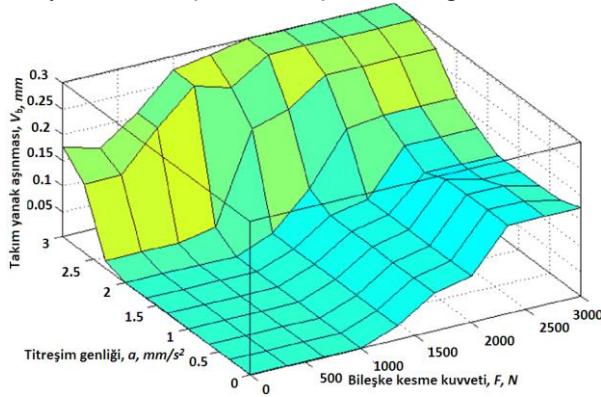
yapılmıştır. Bu blok diyagrama kesme parametreleri, algılayıcılardan alınan kesme kuvveti ve titreşim değerleri girdi olarak verilir ve aşınma miktarı anlık olarak tahmin edilir. Tüm deneyler için tahmin edilen takım yanak aşınması çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Ölçülen ve tahmin edilen takım yanak aşınması değerleri (Measured and estimated values of tool flank wear)

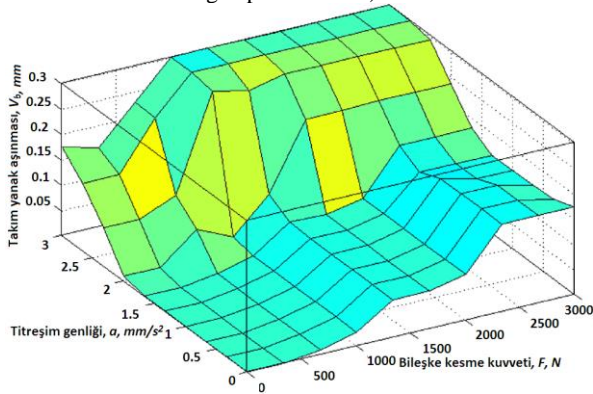
Deney Sayısı	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Kesme derinliği (mm)	Kesme kuvveti (N)	Ölçülen takım aşınması(mm)	Tahmin edilen takım aşınması (mm)
1	100	0,18	1	603,844	0	0,0069
2	100	0,18	1	716,766	0,1	0,0985
3	100	0,18	1	800,850	0,2	0,196
4	100	0,18	1	939,852	0,3	0,302
5	125	0,28	1	851,315	0	0,0027
6	125	0,28	1	889,973	0,1	0,103
7	125	0,28	1	909,612	0,2	0,2
8	125	0,28	1	992,299	0,3	0,298
9	150	0,23	1	828,004	0	0,0069
10	150	0,23	1	832,124	0,1	0,103
11	150	0,23	1	859,598	0,2	0,197
12	150	0,23	1	896,702	0,3	0,298
13	100	0,23	1,5	1149,429	0	0,0069
14	100	0,23	1,5	1230,629	0,1	0,103
15	100	0,23	1,5	1332,336	0,2	0,198
16	100	0,23	1,5	1346,939	0,3	0,299
17	125	0,18	1,5	902,575	0	0,0069
18	125	0,18	1,5	1019,993	0,1	0,104
19	125	0,18	1,5	1063,401	0,2	0,198
20	125	0,18	1,5	1108,774	0,3	0,298
21	150	0,28	1,5	1231,604	0	0,0025
22	150	0,28	1,5	1243,881	0,1	0,105
23	150	0,28	1,5	1257,394	0,2	0,202
24	150	0,28	1,5	1493,175	0,3	0,298
25	100	0,28	2	1598,163	0	0,0069
26	100	0,28	2	1771,536	0,1	0,103
27	100	0,28	2	1808,244	0,2	0,197
28	100	0,28	2	1941,211	0,3	0,298
29	125	0,23	2	1394,473	0	0,007
30	125	0,23	2	1471,303	0,1	0,103
31	125	0,23	2	1643,882	0,2	0,197
32	125	0,23	2	1853,714	0,3	0,298
33	150	0,18	2	1176,293	0	0,0025
34	150	0,18	2	1265,147	0,1	0,103
35	150	0,18	2	1374,902	0,2	0,202
36	150	0,18	2	1462,103	0,3	0,298

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Takım aşınmasının anlık olarak tahmini için, bir bulanık mantık sistemi tasarlanmıştır. Bu çalışmanın amacı, titreşim ve kesme kuvveti değişkenlerini kullanarak anlık olarak takım aşınmasının izlenmesini ve tahminini sağlayan bir bulanık sistemin uygulamasıdır. Takım aşınmasının, kesme kuvvetinin ve titreşim genliğinin ilişkileri 3 boyutlu olarak Şekil 9'da verilmiştir. Ayrıca farklı kesme parametrelerine ait olan takım aşınmasının yüzey modeli, titreşim genliği ve kesme kuvvetine bağlı 3 boyutlu olarak, Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir.

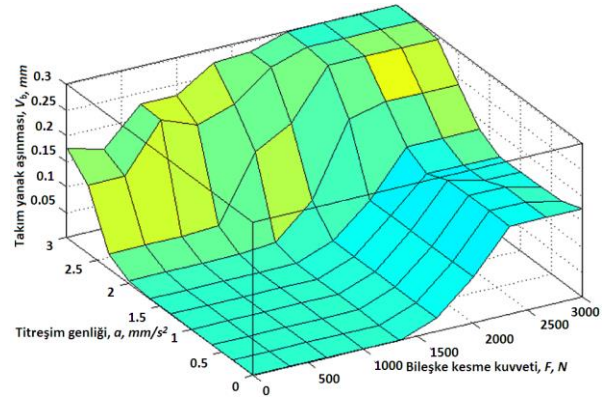


Şekil 9. Takım aşınması, kesme kuvveti ve titreşim arasında oluşan ilişki; kesme hızı: 150 m/dak, ilerleme: 0,28 mm/dev ve kesme derinliği: 1,5 mm. (The relation between tool wear, shear force and vibration; cutting speed: 150 m/min, feed rate: 0.28 mm/rev and cutting depth: 1.5 mm.)



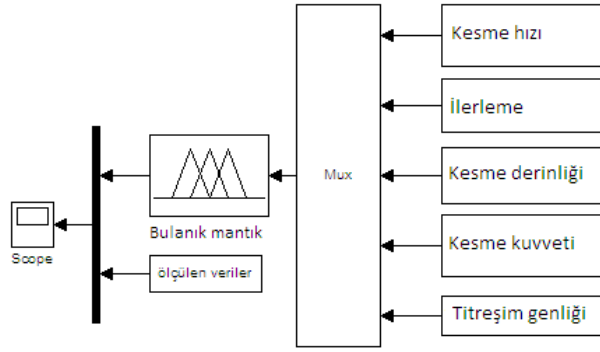
Şekil 10. Takım aşınması, kesme kuvveti ve titreşimin arasında oluşan ilişki; kesme hızı: 100 m/dak, ilerleme: 0,18 mm/dev ve kesme derinliği: 1 mm. (The relation between tool wear, shear force and vibration; cutting speed: 100 m/min, feed rate: 0.18 mm/rev and cutting depth: 1 mm.)

Şekillerde görüldüğü gibi, talaş kaldırma sürecinde takım aşınma ve kesme kuvveti arasında hızlı bir gelişme gözükmemektedir. Aynı zamanda takım aşınması arttığında, titreşim genliği değerleri artmaktadır. Ayrıca, yeni ve aşınmış uç arasında, kesme kuvveti yaklaşık %70 farklılık göstermiştir. Bu nedenle takım aşınmasının tahmini için kesme kuvveti en etkin değişkendir. Şekil

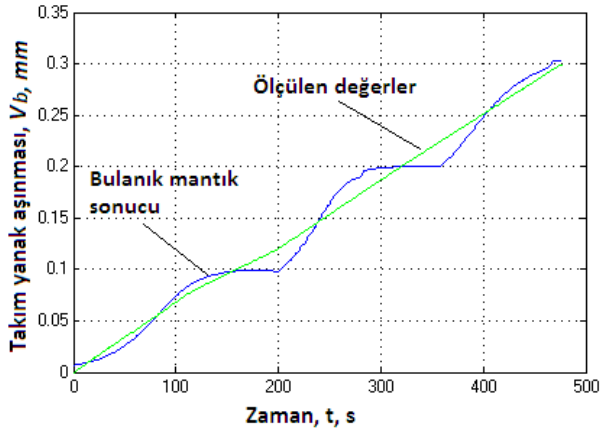


Şekil 11. Takım aşınması, kesme kuvveti ve titreşimin arasında oluşan ilişki; kesme hızı: 125 m/dak, ilerleme: 0,23 mm/dev ve kesme derinliği: 2 mm. (The relation between tool wear, shear force and vibration; cutting speed: 125 m/min, feed rate: 0.23 mm/rev and cutting depth: 2 mm.)

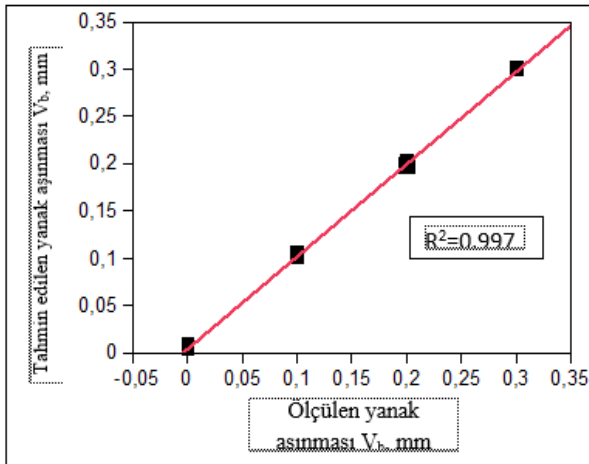
9'da görüldüğü gibi, talaş kaldırma işlemine başlanmadan önce takım aşınması sıfır olarak belirlenmiştir. Talaş kaldırma işlemi sürecinde kesme kuvveti artmakta ve aynı zamanda takım aşınmaya devam etmektedir. Aşınma miktarı 0,3 mm olduğunda, takım aşınmış ve ömrü tükenmiş kabul edilmiştir. Dolayısıyla yanak aşınma miktarı 0,3 mm olduğunda takımın değişmesi gerekir ve kesme işlemi durdurulur, ancak kesme işlemi durdurulmazsa bulanık sistemi yanak aşınma değerini sabit 0,3 mm olarak göstermeye devam edecektir. Aynı durum Şekil 10 ve Şekil 11'de görülmektedir. Bu sistemde, kesme parametrelerinin en önemli rolleri, sadece yeni bir takım için kesme kuvveti ve titreşim genliği miktarlarının değişmesidir. Ancak, talaş kaldırma süresinde takım aşınmaya başladığında bu sabit kesme parametrelerinin etkisi düşmektedir. Bundan dolayı takım aşınmasının tahmini ve izlenmesi, dinamometre ve titreşim ölçerinin kullanılmasıyla gerçekleşir. Ancak, kesme kuvvetinin etkisi titreşime göre daha güvenilir bulunmuştur. Talaş kaldırma süresinde, başka ses ve gürültülerden bağımsız olarak titreşim ölçmenin zorluğu, sinyallerin güvenilir bir şekilde ölçülmesi gerekliliğini zayıflatmaktadır. Aşınmanın izleme boyunca güvenilir verilere dayalı olması gerekli bulunmaktadır. Şekil 12'de, tasarlanan simülasyon sistemi kullanılarak belli bir kesme parametreleri için ölçülen ve tahmin edilen aşınma miktarlarının simülasyonu yapılmıştır. Şekil 13'te, simülasyondan alınan takım aşınma miktarlarının ve ölçülen miktarların zaman boyunca değişimi görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi, bulanık mantıktan alınan sonuçlar, yüksek doğrulukla ölçülen sonuçlarla örtüşmektedir. Ayrıca, bütün veriler için, bulanık mantıktan alınan sonuçlar, ölçülen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Şekil 14'te görüldüğü gibi bu karşılaştırma sonucunun göstergesi olan R^2 değeri 0,997 olarak elde edilmiştir.



Şekil 12. Takım aşınması tahmin sisteminin simülasyonu (Simulation of tool wear estimation system)



Şekil 13. Talaş kaldırma sürecince takım aşınmasının karşılaştırılması; kesme hızı: 100 m/dak, ilerleme: 0,18 mm/dev ve kesme derinliği: 1 mm. (Comparison of tool wear during chip removal; cutting speed: 100 m/min, feed rate: 0.18 mm/rev and cutting depth: 1 mm)



Şekil 14. Bulanık mantıkla tahmin edilen ve ölçülen takım aşınmalarının karşılaştırılması (Comparison of estimated and measured tool abrasions with fuzzy logic)

Önerilen yöntemin en önemli olumlu yönü, belli bir deney sayısı için tahmin sistemi kurmanın bulanık

mantık yöntemiyle kolay ve pratik olmasıdır. Bu yöntem CNC makinelerinde üretim yapan tüm işletmelerde kesen-kesilen çiftine dayalı veri tabanı oluşturmak için son derece hızlı ve kolay uygulandığı bulunmuştur. Diğer taraftan statiksel yöntemlerle veya yapay sinir ağlarıyla takım aşınmasının izlenme ve tahmin prosedürü, bulanık mantık yöntemi ile mukayese edildiğinde de son derece az parametre sayısı ile güvenilir sonuçların elde edileceğini ortaya koymuştur ($R^2=0.997$). Titreşim ölçer veya dinamometre gibi algılayıcılar kullanılarak, sürekli talaşlı imalat yapan birimlerin tarafından bu yöntemin gerçekleştirilmesi mümkün görülmektedir. Ayrıca, bulanık mantık üzerine yapılan tahmin sistemi, talaşlı imalat işlemlerinde adaptif kontrolün kullanılmasına da zemin hazırlar. Bulanık mantık metodunun adaptif kontrol üzerine uygulanması, bir sonraki araştırmanın önceliği olarak dikkate alınacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, 07/2012-23 kodu ile Gazi Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projesi tarafından desteklenmiştir. Destekten dolayı yazarlar G.Ü. B.A.P birimine teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Zhu Kumpeng, W., HongGeokSoon, "Wavelet analysis of sensor signals for tool condition monitoring: A review and some new results. ", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 49: 537-553, (2009).
- [2] Xiaoli Li, S. K. T., "Drill wear monitoring based on current signals", *Wear*. 231: 172-178, (1999).
- [3] Teti, R., Jemielniak, K., O'Donnell, G., *et al.*, "Advanced monitoring of machining operations", *Cirp Annals-Manufacturing Technology*. 59: 717-739, (2010).
- [4] Jantunen, E., "A summary of methods applied to tool condition monitoring in Drilling", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 42: 997-1010, (2002).
- [5] Liang, S. Y., Hecker, R. L. and Landers, R. G., "Machining process monitoring and control: The state-of-the-art", *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme*. 126: 297-310, (2004).
- [6] Niu, Y., Wong, Y. and Hong, G., "An intelligent sensor system approach for reliable tool flank wear recognition", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 14: 77-84, (1998).
- [7] Dong, J., Subrahmanyam, K. V. R., Wong, Y. S., *et al.*, "Bayesian-inference-based neural networks for tool wear estimation", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 30: 797-807, (2006).
- [8] U. Zuperl, F. C., J. Balic, "Intelligent cutting tool condition monitoring in milling", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 49: 477-486, (2011).
- [9] Ertekin, Y. M., Kwon, Y. and Tseng, T.-L., "Identification of common sensory features for the control of CNC milling operations under varying cutting conditions", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 43: 897-904, (2003).
- [10] Chen, S.-L. and Jen, Y. W., "Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling

- machining”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 40: 381-400, (2000).
- [11] Liu, Y.and Wang, C., “Neural network based adaptive control and optimization in the milling process”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 15: 791-795, (1999).
- [12] Yusuf, A., “In-process detection of tool breakages using time series monitoring of cutting forces”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 28: 157-172, (1988).
- [13] Zhang, J.and Chen, J., “The development of an in-process surface roughness adaptive control system in end milling operations”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 31: 877-887, (2007).
- [14] Benardos, P. G.and Vosniakos, G. C., “Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi’s design of experiments”, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 18: 343-354, (2002).
- [15] Azouzi, R.and Guillot, M., “On-line prediction of surface finish and dimensional deviation in turning using neural network based sensor fusion”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 37: 1201-1217, (1997).
- [16] El Ouafi, A., Guillot, M.andBedrouni, A., “Accuracy enhancement of multi-axis CNC machines through on-line neurocompensation”, *Journal of Intelligent Manufacturing*. 11: 535-545, (2000).
- [17] Byrne, G., Dornfeld, D.andDenkena, B., “Advancing Cutting Technology”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 52: 483-507, (2003).
- [18] Kilundu, B., Dehombreux, P.andChimentin, X., “Tool wear monitoring by machine learning techniques and singular spectrum analysis”, *Mechanical Systems and Signal Processing*. 25: 400-415, (2011).
- [19] Ding, F.and He, Z., “Cutting tool wear monitoring for reliability analysis using proportional hazards model”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 57: 565-574, (2011).
- [20] Noh, M.-S.and Hong, D., “Implementation of remote monitoring system for prediction of tool wear and failure using ART2”, *Journal of Central South University of Technology*. 18: 177-183, (2011).
- [21] Zadeh, L. A., “Fuzzy sets”, *Information and Control*. 338-353, (1965).
- [22] Amrita Sarkar, G. S. a. U. C. S., “APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN TRANSPORT PLANNING”, *International Journal on Soft Computing*. 3: 1-21, (2012).
- [23] Sharma, V., Sharma, S. K.andSharma, A., “Cutting tool wear estimation for turning”, *Journal of Intelligent Manufacturing*. 19: 99-108, (2008).

Santrifüj Döküm Yöntemiyle Üretilen Al-Cu Fonksiyonel Derecelenmiş Malzemelerde Üretim Parametrelerinin Malzemenin Sertliği Üzerine Etkisi

Semih AĞCA^{1*}, Neşet AKAR²

¹Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06020, Keçiören, Ankara

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500, Teknikokullar, Ankara

(Geliş/Received : 17.03.2016 ; Kabul/Accepted : 05.04.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, soğuma hızı (0,27 – 7,38 – 14,23 – 21,56 °C/s), kalıp dönme hızı (160 – 225 – 275 rpm) ve döküm atmosferi (açık atmosfer – vakum atmosferi) parametrelerinin santrifüj döküm yöntemiyle üretilen Al-Cu fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) sertliği üzerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan deneysel araştırmalar sonucunda, soğuma hızının artması ile sertlik değerinin arttığı ve diğer parametrelerin etkisinin soğuma hızına bağlı olarak farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Yüksek (7,38 – 14,23 – 21,56 °C/s) soğuma hızlarında üretilen döküm parçalarının bütün bölgelerinde, kalıp dönme hızı arttıkça sertlik artmış ve açık atmosferde üretilen numunelerin sertliği vakum atmosferinde üretilenlerden daha yüksek çıkmıştır. Düşük (0,27 °C/s) soğuma hızında ise, kalıp dönme hızı arttıkça sertlik, numunenin dönme merkezine uzak bölgesinde artmış, orta bölgede değişmemiş ve dönme merkezine yakın bölgesinde de azalmıştır. Bununla birlikte, açık atmosferde üretilen numunelerin sertliği merkeze uzak bölgede vakum ortamında üretilenlerden daha düşük, orta bölgede aynı ve merkeze yakın bölgede de daha yüksektir. Bu sonuçlar santrifüj döküm yöntemiyle FDM üretiminde, üretim parametrelerinin birbirleri ve malzemenin sertliği üzerine etkisi olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: FDM, Santrifüj Döküm, Sertlik.

Effect of Fabrication Parameters on Hardness of Al-Cu Functionally Graded Materials Manufactured by Centrifugal Casting

ABSTRACT

In this study, the effect of cooling rate (0,27 – 7,38 – 14,23 – 21,56 °C/s), mold rotation speed (160 – 225 – 275 rpm), and casting atmosphere (air – vacuum) on hardness of Al-Cu functionally graded materials (FGMs) were investigated. According to the experimental results, it was found that the hardness value became higher with increasing cooling rate and efficiency of other parameters varied according to cooling rate. The hardness increased with increasing mold rotation speed and hardness values of specimens produced in air atmosphere are higher than that of manufactured in vacuum atmosphere for all parts of specimens produced in high (7,38 – 14,23 – 21,56 °C/s) cooling rates. On the other hand, the specimens produced in low cooling rate (0,27 °C/s) have varying hardness values depending on the location of the cast part. Hardness increased with increasing mold rotation speed in the far part of specimens to the rotation axis. It remained unchanged in middle section and decreased with increasing mold rotation speed in parts close to the rotation axis. Also, hardness values of specimens obtained in air atmosphere are lower in far part, same in middle and higher in rotation axis by comparison with the specimens obtained in vacuum atmosphere. Results showed that all parameters affected each other and the hardness in fabrication of FGMs by centrifugal casting.

Keywords: FGMs, Centrifugal Casting, Hardness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozisyon ve yapının derecelendirilmiş bir şekilde değiştiği ve bu değişimin malzemenin özelliklerini önemli derecede etkilediği malzemelere fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) denilmektedir [1]. Refrakter özellikte seramik malzeme ile metalik malzemenin bir arada kullanıldığı FDM en iyi bilinen örnekler

arasındadır. Bu malzemede seramik bileşenin ısı, aşınma ve korozyon direnci ile metalik malzemenin yüksek tokluk, dayanım ve işlenebilirlik özellikleri bir arada bulunmaktadır. FDM'nin derecelendirilmemiş kompozitlere göre en büyük üstünlüğü termal şoklara daha dayanıklı olmasıdır [2].

Yapı bakımından katmanlı ve sürekli derecelendirilmiş olarak iki kategoride incelenebilecek olan FDM'nin üretimi birçok yöntemle gerçekleştirilebilir. Termal püs-

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: aqcasemih@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 121-127

kürtme, toz metalürjisi, elektroforetik biriktirme, infiltrasyon ve santrifüj döküm bilinen üretim yöntemlerindedir [3]. Termal püskürtme ve toz metalürjisi gibi yöntemlerle katmanlı derecelendirilmiş yapı elde edilirken, santrifüj döküm yöntemi ve infiltrasyon gibi yöntemlerle de sürekli derecelendirme mümkün olmaktadır. Sürekli derecelendirilmiş yapılarda termal şoklara dayanım ve değişken mekanik yüklerle karşı direnç daha yüksek olmaktadır. Santrifüj döküm yönteminin diğer avantajları ise üretim kolaylığı ve düşük maliyettir.

Santrifüj döküm yöntemi ile partikül takviyeli FDM üretimi mümkün olmaktadır [4]. Literatürde partikül takviyeli FDM üretimi için katı partikül ve in-situ (dışarıdan ilave edilmeksizin yapı içerisinde kendiliğinden oluşan) partikül santrifüj olmak üzere iki farklı yöntem yer almaktadır [5-7]. Üretim sıcaklığı, temel alaşım elementinin likidüs sıcaklığından katı partikül santrifüj yönteminde daha düşük, in-situ partikül santrifüj yönteminde ise daha yüksektir [8]. Araştırmacılar, partikül-matris arayüzey uyumunun daha iyi olmasından dolayı, in-situ partikül santrifüj yöntemine daha çok ilgi göstermişlerdir [9].

Bu çalışmada, santrifüj döküm yöntemi ile Al-Cu ötektik alaşımından FDM üretimi gerçekleştirilmiş ve üretim parametrelerinin malzemenin sertliği üzerine etkileri araştırılmıştır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Saf alüminyum (% 99,7) ve saf bakır (% 99,99) ağırlıkça % 67 ve % 33 oranlarında tartıldıktan sonra ergitilmiştir.

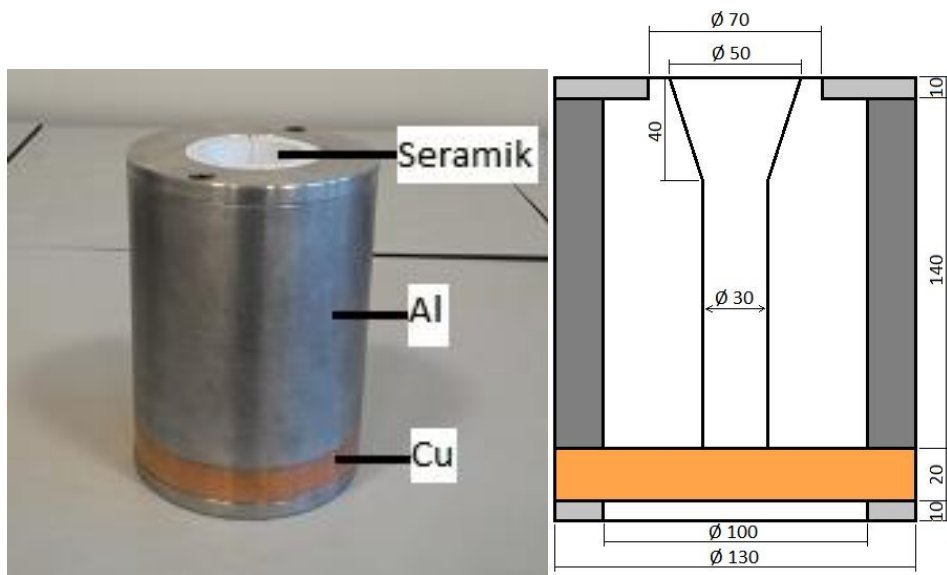
Alaşımın kimyasal kompozisyonunu kontrol etmek için potanın üst, orta ve alt kısımlarından alınan örnekler SPECTROMAXx marka optik emisyon spektrometresi ile incelenmiş ve tamamının ötektik kompozisyonda olduğu görülmüştür. Daha sonra, Al-Cu ötektik alaşımı kıl kalıplara dökülerek santrifüj döküm işlemi için ön-numuneler hazırlanmıştır. Ön-numune içerisinde bulunan elementlerin ağırlıkça oranları Çizelge 1'de gösterilmiştir. Santrifüj döküm yöntemi kapalı bir sistem olduğu ve malzeme ilavesi mümkün olmadığından ön-numune hacmi, kalıp boşluğu hacmi ile uygun olacak şekilde seçilmiştir.

Çeşitli soğuma hızları kalıp tasarımında yapılan değişiklikler ile elde edilmiştir. Santrifüj döküm yönteminde kullanılan, seramik ve metal parçalardan oluşan kalıp seti Şekil 1'de gösterilmiştir.

Kalıbın dış ölçüleri santrifüj döküm makinesinin kalıp tutucu bölmesine uygun olacak şekilde ayarlanmıştır. Santrifüj döküm sırasında oluşacak olan yüksek basınca kalıbın dayanabilmesi için dış katman Al-6061 alüminyum alaşımından üretilmiştir. İstenen soğuma hızlarını elde edebilmek için kalıp tabanına bakır soğutucu yerleştirilmiş ve sıvı metalin bakır soğutucuya temas ettiği alan değiştirilmiştir. Ayrıca ısı akışının daha çok bakır soğutucu yönünde olmasını sağlamak adına kalıbın iç katmanını izolasyon özelliği yüksek seramik malzemeden üretilmiştir. Dört farklı soğuma hızının elde edilmesi için kullanılan seramik iç katmanlar Şekil 2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Ön-numunelerin kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of pre-samples)

Element	Al	Cu	Si	Fe	Mn	P	Cr	Zn
Ağırlıkça %	66,9	32,87	0,033	0,15	0,0025	0,00185	0,0054	0,03



Şekil 1. Santrifüj döküm yönteminde kullanılan kalıp seti (Mold set used in centrifugal casting)



Şekil 2. Farklı soğuma hızlarının elde edilmesi için kullanılan seramik iç katmanlar (Ceramic inner layers that used for obtaining different cooling rates)

Isı transfer katsayılarının işlem boyunca değişmediği ve ısı akışının sabit olduğu varsayımlarının yapıldığı, ayrıca taşınım ve ışınım ile ısı geçişinin ihmal edildiği hesaplamalara göre soğuma hızları 0,27 °C/s, 7,38 °C/s, 14,23 °C/s ve 21,56 °C/s olarak tespit edilmiştir. Kalıp tabanında sıvı alaşım ile bakır soğutucunun direkt temas ettiği kalıp tasarımlarında, tabandan gerçekleşen ısı transferi Eşitlik 1'e göre hesaplanmıştır.

$$Q = k_{Cu} A \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

Eşitlik 1'de gösterilen Q sistemden atılan ısı miktarı, k_{Cu} (401 W/m.K) bakır soğutucunun ısı iletim katsayısı, A ısı transferi yönüne dik yüzey alanı, ΔT döküm sıcaklığı ile deney ortamı sıcaklığı arasındaki farkı ve L bakır soğutucunun et kalınlığıdır. Kalıp tabanında sıvı alaşım ile bakır soğutucunun arasına izolasyon malzemesi yerleştirilen kalıp tasarımında, tabandan gerçekleşen ısı transferi Eşitlik 2'ye göre hesaplanmıştır.

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{L_1}{k_{S1}A} + \frac{L_2}{k_{Cu}A}} \quad (2)$$

Eşitlik 2'deki L_1 (15 mm) ve L_2 (20 mm) tabandaki seramik ve bakır soğutucunun et kalınlıkları, k_{S1} (0,13 W/m.K) ise seramik silindir parçanın ısı iletim katsayısıdır. Numunenin etrafını saran, seramik ve alüminyumdan oluşan silindirik yapıdan gerçekleşen ısı transferi Eşitlik 3'e göre hesaplanmıştır.

$$Q = \frac{\Delta T}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_{S2}L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_{Al}L}} \quad (3)$$

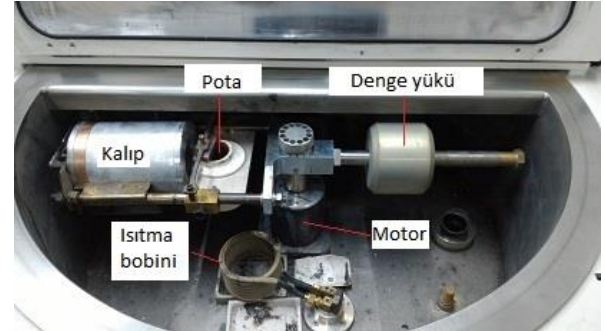
Eşitlik 3'te verilen r_1 kalıp boşluğunun, r_2 seramik kalıbın ve r_3 alüminyum dış gövdenin yarıçaplarıdır. k_{S2} (0,26 W/m.K) ve k_{Al} (167 W/m.K) seramik kalıp ve alüminyum gövdenin ısı iletim katsayılarıdır. Tabandan ve silindirik yüzeyden gerçekleşen toplam ısı transferi Eşitlik 4'te kullanılmış ve bu eşitlikten soğuma hızları tespit edilmiştir.

$$Q_T = mc\Delta T \quad (4)$$

Eşitlik 4'te verilen Q_T tabandan ve silindirik yüzeyden atılan toplam ısı miktarı, m (0,5124 kg) kalıba doldurulan Al-Cu ötektik sıvının ağırlığı, c (895 J/kg.K) Al-Cu

ötektikinin sıvı haldeki ısı kapasitesi ve ΔT soğuma hızı değerini veren, ötektik alaşımın sıcaklığının değişim miktarıdır. En düşük soğuma hızı, bakır soğutucu ile sıvı metalin temasının seramik izolasyon malzemesinden üretilmiş silindirik parçayla tamamen kesildiği tasarımda elde edilmiştir.

Santrifüj döküm işlemi Topcast TCE santrifüj döküm makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği ve kalıp yerleşimi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği (Experimental set-up)

Her üretim için döküm sıcaklığı 700 °C, seramik parçaların ön ısıtma sıcaklığı 200 °C ve ergitme süresi 6 dakika olarak sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler Çizelge 2'de gösterilmiştir.

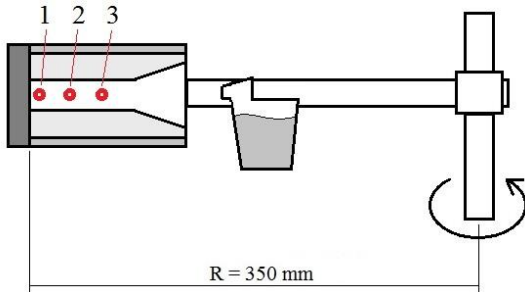
Çizelge 2. Deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler (Parameters used in experimental studies)

Parametre	Değer
Soğuma hızı (°C/s)	0,27 – 7,38 – 14,23 – 21,56
Kalıp dönme hızı (rpm)	160 – 225 – 275
Döküm atmosferi	Açık atmosfer – Vakum (200 mBar)

Açık atmosfer ve vakum ortamında yapılan ergitmelerin tamamında döküm alaşımı ergiyene kadar vakum uygulanmıştır. Açık atmosferde yapılan ergitmelerde, ergime sonrası sıvı metal 700 °C sıcaklığa ulaşınca

vakum durdurulmuş ve sistemin içine hava dolması sağlanmıştır. Vakum atmosferinde yapılan üretimlerde ise ilk uygulanan vakum döküm işlemi bitip katılaşma tamamlanmaya kadar sabit tutulmuştur. İstenilen döküm atmosferi ve döküm sıcaklığı elde edildikten sonra kalıp döndürme işlemi başlatılmış ve bu işlem katılaşma sonlanana kadar devam etmiştir.

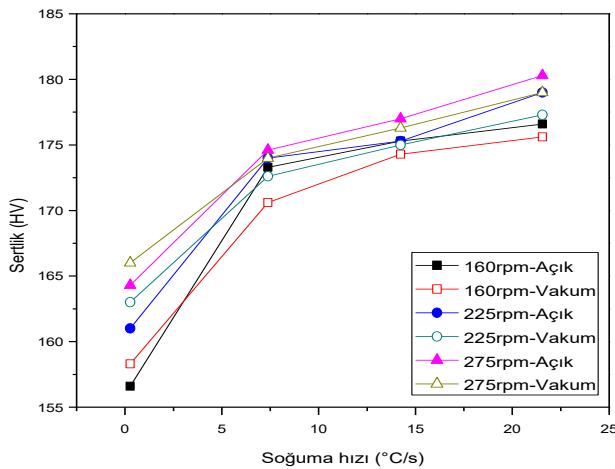
Üretilen numunelerin sertlik değerleri EMCOTEST DuraVision marka cihazla ölçülmüştür. Mikroyapıların görüntülenmesinde ise Leica DMI5000M marka mikroskop kullanılmıştır. Numunelerin kimyasal kompozisyonları SPECTROMAXx marka optik emisyon spektrometresi ile tayin edilmiştir. Ayrıca, numunelerin faz hacim oranları Leica Application Suite V 4.6 görüntü analiz programı aracılığıyla ölçülmüştür. Sertlik testi, spektrometre analizi, mikroyapı görüntüleme ve faz hacim oranı ölçümü her numunenin üç ayrı bölgesine en az üç tekrar ile uygulanmıştır. Bu bölgeler Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Test, analiz ve görüntüleme yapıldığı bölgeler (Parts of test, analysis and visualization)

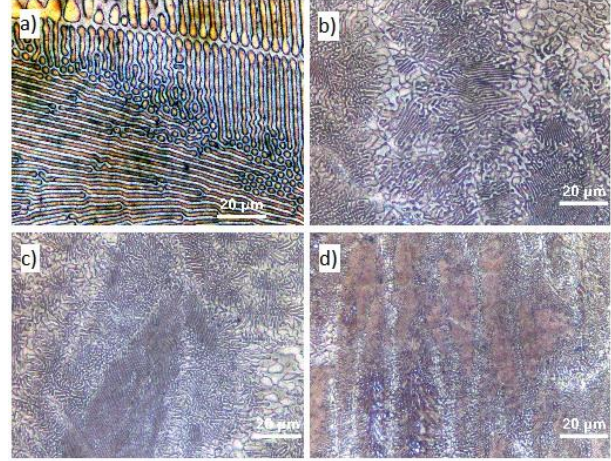
3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Santrifüj döküm yöntemi ile üretilen numunelerin bakır soğutucuya en yakın bölümünden alınan sertlik değerlerinin soğuma hızına bağlı değişimi Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Numunelerin sertlik değerinin soğuma hızına bağlı değişimi (Effect of cooling rate on hardness of specimens)

Sertlik deneyi sonuçları, soğuma hızı arttıkça sertliğin arttığını göstermiştir. Soğuma hızı arttıkça ikincil dendrit kolları arası mesafe ve tane boyutunun küçülmüş olması sertliği artıran faktörlerdir [10-12]. Farklı soğuma hızlarında üretilmiş numunelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Farklı soğuma hızlarında üretilmiş numunelere ait mikroyapı görüntüleri; a) 0,27 °C/s, b) 7,38 °C/s, c) 14,23 °C/s, d) 21,56 °C/s (Microstructures of specimens obtained in different cooling rates)

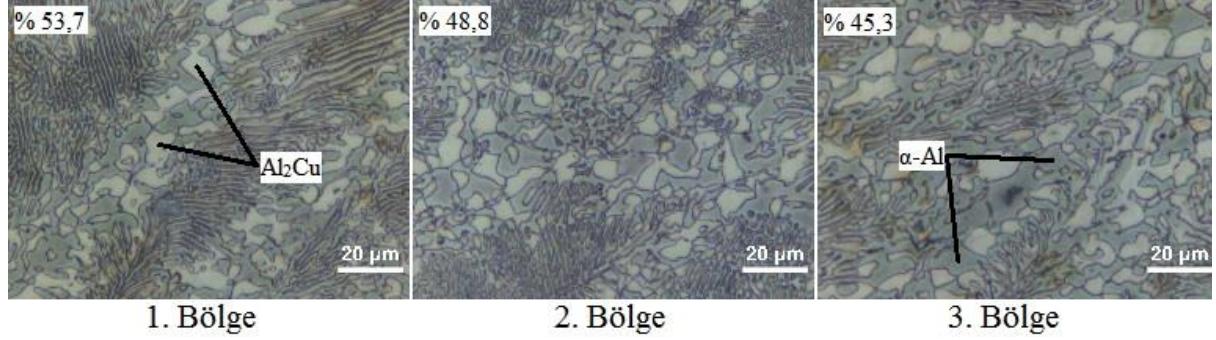
Optik emisyon spektrometre analizleri sonucunda, numunelerin farklı bölgeleri arasında bakır konsantrasyonu açısından % 1,4'e kadar fark olduğu tespit edilmiştir. Numunelerin farklı bölgelerine ait bakır konsantrasyonları Çizelge 3'te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Numunelerin farklı bölgelerine ait bakır konsantrasyonları (Cu contents in different parts of specimens)

Üretim şartları	Ağırlıkça % bakır		
	1. Bölge	2. Bölge	3. Bölge
0,27 °C/s – 160 rpm – Açık	33,2	33	32,9
0,27 °C/s – 160 rpm – Vakum	33,4		32,9
0,27 °C/s – 225 rpm – Açık	33,5		32,8
0,27 °C/s – 225 rpm – Vakum	33,6		32,7
0,27 °C/s – 275 rpm – Açık	33,8		32,6
0,27 °C/s – 275 rpm – Vakum	34		32,6
7,38 °C/s – 275 rpm – Açık	33,04		32,95
7,38 °C/s – 275 rpm – Vakum	33,05		32,95
21,56 °C/s – 160 rpm – Açık	33,01		32,98
21,56 °C/s – 160 rpm – Vakum	33,02		32,97

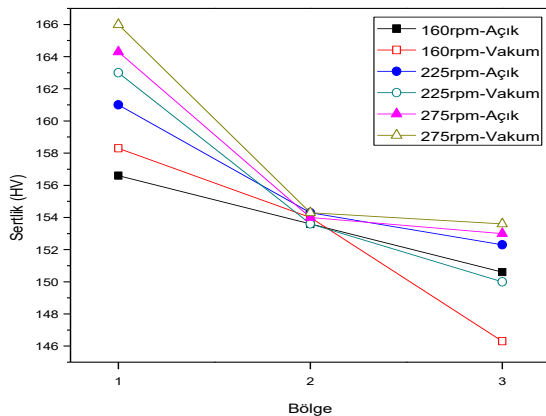
Çizelge 3'te, kimyasal kompozisyon açısından derecelendirmenin başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Dönme kuvveti etkisiyle numunenin dönme merkezine uzak bölgesinde bakır konsantrasyonundaki artış Al₂Cu

faz hacim oranını artırmıştır. Orta bölgede Al₂Cu faz hacim oranı değişmemiş ve numunenin dönme merkezine yakın bölgesinde Al₂Cu faz hacim oranı bakır konsantrasyonundaki azalışla birlikte azalmıştır. Bu durum literatürdeki diğer çalışmalarla uyumluluk göstermektedir [13,14]. Düşük soğuma hızında üretilen numunenin farklı bölgelerine ait mikroyapı görüntüleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. 0,27 °C/s soğuma hızında üretilen numunenin farklı bölgelerine ait mikroyapı görüntüleri (Microstructures of different parts of specimen obtained in 0,27 °C/s cooling rate)

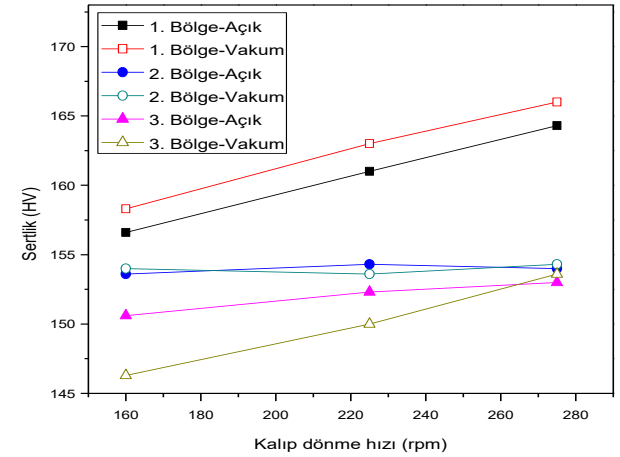
Şekil 7'de gösterilen faz tanımlamaları literatürdeki benzer çalışmalara göre yapılmıştır [13,14]. Al₂Cu faz hacim oranının farklı bölgelerde % 53,7 - % 48,8 - % 45,3 değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Kimyasal kompozisyon farkının çok küçük olması ve düzensiz katılma şartlarından dolayı birincil partikül oluşumu yerine dendrit kollarının kabalaştığı gözlemlenmiştir. Bu durum literatürde ayrılmış ötektik oluşumu ile açıklanmıştır [13]. Ötektik yapı içerisindeki Al₂Cu fazı sert ve α -Al fazı yumuşak olduğundan, bu fazların yoğunlukta olduğu bölgelerde sertliği önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Düşük soğuma hızlarında katılma daha geç tamamlanacağından dolayı kimyasal kompozisyon farkı daha yüksek olmaktadır. Şekil 8'de en düşük soğuma hızında (0,27 °C/s), kalıp dönme hızı ve döküm atmosferine bağlı olarak numunelerin farklı bölgelerindeki sertlik değerlerinin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 8. 0,27 °C/s soğuma hızında kalıp dönme hızı ve döküm atmosferine bağlı olarak numunelerin farklı bölgelerindeki sertlik değerlerinin değişimi (Change of hardness values on different parts of specimens according to mold rotation speed and casting atmosphere in 0,27 °C/s cooling rate)

0,27 °C/s soğuma hızında üretilen numunelerin tamamında birinci bölgenin en sert ve üçüncü bölgenin de en yumuşak bölge olduğu görülmektedir. Kalıp dönme hızının sertlik üzerindeki etkisi Şekil 9'da gösterilmiştir.

Birinci bölgede kalıp dönme hızı arttıkça sertlik artmıştır. Bunun sebebi, artan hızla beraber uç bölgede bakır konsantrasyonunun daha yüksek olması sonucu yüksek



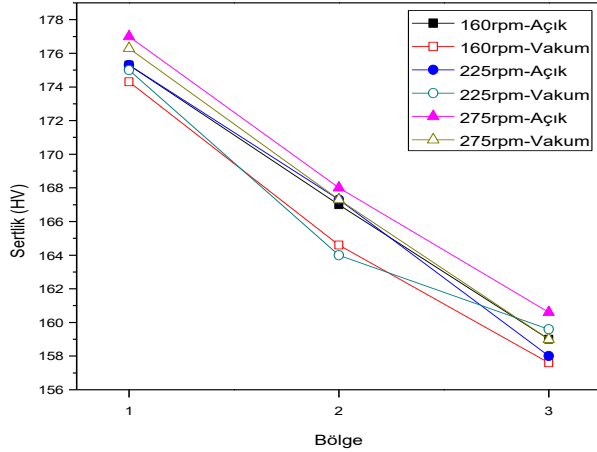
Şekil 9. 0,27 °C/s soğuma hızında kalıp dönme hızının sertlik üzerine etkisi (Effect of mold rotation speed on hardness of specimens in 0,27 °C/s cooling rate)

sertlikteki Al₂Cu faz hacim oranının artışıdır. Vakum, ortamdaki hava molekülleri sayısını azaltıp taşınım ile ısı transferini önemli derecede engellediğinden alaşımın daha uzun süre sıvı kalmasını sağlayarak kimyasal kompozisyon farkının daha yüksek olmasına sebep olmuştur. Bunun sonucunda vakum ortamında üretilen numunelerin sertlik değerleri açık atmosferde üretilenlerden daha yüksek olmuştur. İkinci bölgede Al₂Cu faz hacim oranı değişmediğinden kalıp dönme hızı ve döküm atmosferi değişikliğinin sertlik üzerinde önemli bir etkisi olmamıştır [15,16].

Üçüncü bölgede ise kalıp dönme hızı arttıkça sertlik artarak ikinci bölgedeki sertlik değerine kadar yükselmiştir. α -Al fazı, yüksek dönme hızlarında besleyici bölgesinde birikmesi sonucu üçüncü bölgedeki Al₂Cu faz hacim oranı ikinci bölge ile yakın değerlerde olmuştur. Bundan dolayı, yüksek dönme hızlarındaki

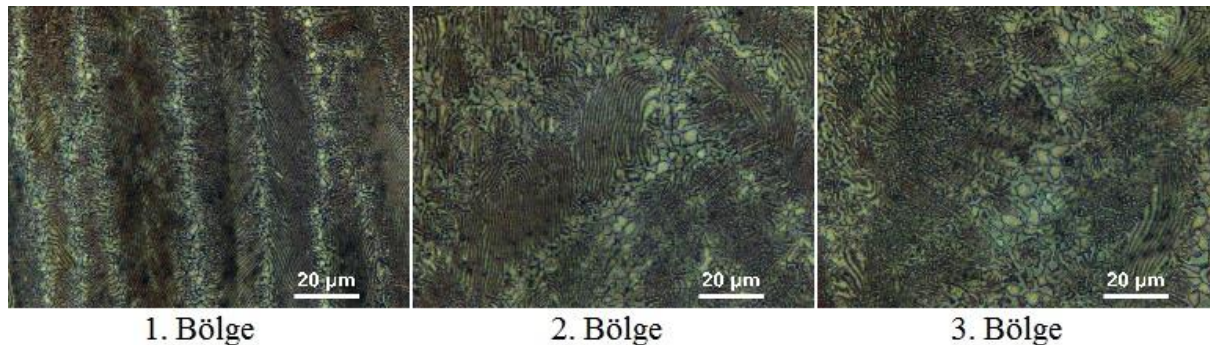
sertlik sonuçları ikinci bölgenin sertlik sonuçlarına çok yakın bulunmuştur.

7,38 °C/s, 14,23 °C/s ve 21,56 °C/s soğuma hızlarında parametrelerin sertliğe etkisi benzer olduğundan sadece 14,23 °C/s soğuma hızında üretilen numunelerin sertlik sonuçları değerlendirilecektir. Yüksek soğuma hızlarında üretilen numunelerin sertlik değerlerindeki değişim düşük soğuma hızında üretilen numunelerinkinden daha farklıdır. Şekil 10'da 14,23 °C/s soğuma hızında üretilen numunelerin sertlik değerlerinin kalıp dönme hızı ve döküm atmosferine bağlı olarak değişimi gösterilmiştir.



Şekil 10. 14,23 °C/s soğuma hızında kalıp dönme hızı ve döküm atmosferine bağlı olarak numunelerin farklı bölgelerindeki sertlik değerlerinin değişimi (Change of hardness values on different parts of specimens according to mold rotation speed and casting atmosphere in 14,23 °C/s cooling rate)

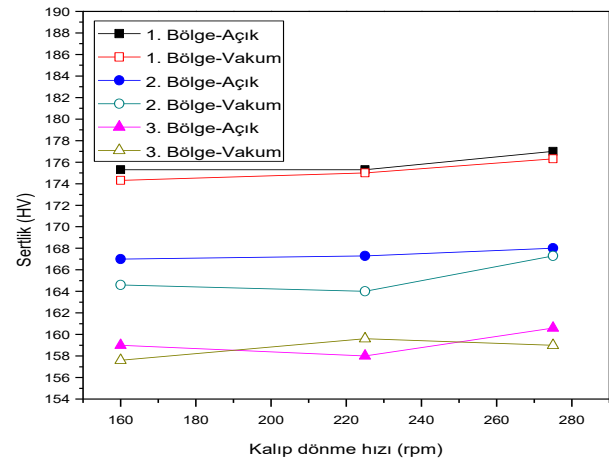
Yüksek soğuma hızlarında kalıp içerisine doldurulan sıvı metalin katılaşması için geçen süre çok kısa olduğundan, üretilen numunelerin farklı bölgeleri arasındaki bakır konsantrasyonu farkı % 0,1 seviyelerinde kalmıştır. Yüksek soğuma hızında üretilen numunenin farklı bölgelerine ait mikroyapı görüntüleri Şekil 11'de gösterilmiştir



Şekil 11. 21,56 °C/s soğuma hızında üretilen numunenin farklı bölgelerine ait mikroyapı görüntüleri (Microstructures of different parts of specimen obtained in 21,56 °C/s cooling rate)

Bölgeler arasındaki sertlik değeri, yavaş soğuma hızındaki Al₂Cu faz hacim oranı değişimi durumundan farklı olarak, bakır soğutucuya olan mesafeye göre değişmiştir. Bu durum, kalıp içerisinde bakır

soğutucudan besleyici bölgesine doğru azalan bir sıcaklık gradyanı oluşumu ile açıklanabilir. Şekil 12'de yüksek soğuma hızlarında kalıp dönme hızının sertlik üzerine etkisi gösterilmiştir.



Şekil 12. 14,23 °C/s soğuma hızında kalıp dönme hızının sertlik üzerine etkisi (Effect of mold rotation speed on hardness of specimens in 14,23 °C/s cooling rate)

Yüksek soğuma hızlarında numunelerin sertlik açısından derecelendirilmesi temel olarak ikincil dendrit kolları arası mesafeye bağlı olduğundan, kalıp dönme hızı ve döküm atmosferinin etkileri ikincil dendrit kolları arası mesafeyi ne ölçüde değiştirebildikleriyle orantılıdır. Vakum atmosferinde üretilen numunelerde, katılaşmanın daha uzun sürede tamamlanmasından dolayı ikincil dendrit kolları arası mesafe daha büyük ve böylece sertlik daha düşük olmuştur. Kalıp dönme hızının etkisi ise katılaşma hızını değiştirmesi ile tanımlanabilir. Kalıp dönme hızı arttıkça sıvı metale uygulanan basınç artar. Sıvı metale uygulanan basıncın artması sıvı metal-kalıp arayüzünün daha iyi temas etmesini ve döküm-kalıp ara yüzeyinden ısının daha hızlı transfer olmasını sağlanmasından dolayı [17-19] katılaşma daha hızlı olmuş, dendrit kolları arası mesafe kısalmış ve bundan

dolayı sertlik artmıştır. Ancak, kalıp dönme hızı ve döküm atmosferinin yüksek soğuma hızlarında üretilen numunelerin sertliği üzerindeki etkisi oldukça düşüktür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Santrifüj döküm yöntemi ile kimyasal kompozisyon, Al₂Cu faz hacim oranı ve sertlik açısından derecelendirilmiş FDM üretimi gerçekleştirilmiştir.
- Sertlik değişimindeki temel etkenin düşük soğuma hızında Al₂Cu faz hacim oranı, yüksek soğuma hızında ise kalıp içerisindeki sıcaklık dağılımı olduğu tespit edilmiştir.
- Soğuma hızının artması ile sertlik artmıştır, diğer parametrelerin etkisi soğuma hızına bağlı olarak farklılık göstermiştir.
- Al-Cu ötektik alaşımının fonksiyonel derecelenmesi; yüksek soğuma hızlarında ikincil dendrit kolları arası mesafenin değişimi, düşük soğuma hızında ise Al₂Cu faz hacim oranı değişimi ile elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Üretim aşamasındaki teknik desteği dolayısıyla Nev Vakumlu Hassas Döküm'e (Newincasting) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Shiota I. and Miyamoto Y., "Functionally graded materials 1996", *Elsevier Science B. V.*, Amsterdam, 1-14, (1997).
2. Miyamoto Y., Kaysser W. A., Rabin B. H., Kawasaki A. and Ford R. G., "Functionally graded materials design, processing and applications", *Springer Science+Business Media*, New York, 1-26, (1999).
3. Kieback B., Neubrand A. and Riedel H., "Processing techniques for functionally graded materials", *Materials Science and Engineering A*, 362: 81-105, (2003).
4. Zhai Y., Liu C., Wang K., Zou M. and Xie Y., "Characteristics of two Al based functionally gradient composites reinforced by primary Si particles and Si/in situ Mg₂Si particles in centrifugal casting", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20: 361-370, (2010).
5. Rajan T. P. D., Pillai R. M. and Pai B. C., "Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites", *Materials Characterization*, 61: 923-928, (2010).
6. Rahvard M. M., Tamizifar M., Boutorabi S. M. A. and Shiri S. G., "Characterization of the graded distribution of primary particles and wear behavior in the A390 alloy ring with various Mg contents fabricated by centrifugal casting", *Materials and Design*, 56: 105-114, (2014).
7. Chumanov I. V., Anikeev A. N. and Chumanov V. I., "Fabrication of functionally graded materials by introducing wolframium carbide dispersed particles during centrifugal casting and examination of FGM's structure", *Procedia Engineering*, 129: 816-820, (2015).
8. Watanabe Y., Kim I.S. and Fukui Y., "Microstructures of functionally graded materials fabricated by centrifugal solid-particle and in-situ methods", *Metals and Materials International*, 11: 391-399, (2005).
9. Arsha A. G., Jayakumar E., Rajan T. P. D., Antony V. and Pai B. C., "Design and fabrication of functionally graded in-situ aluminum composites for automotive pistons", *Materials and Design*, 88: 1201-1209, (2015).
10. Reis B. P., França R. P., Spim J. A., Garcia A., DaCosta E. M. and Santos C. A., "The effects of dendritic arm spacing (as-cast) and aging time (solution heat-treated) of Al-Cu alloy on hardness", *Journal of Alloys and Compounds*, 549: 324-335, (2013).
11. Houria M. I., Nadot Y., Fathallah R., Roy M. and Maijer D. M., "Influence of casting defect on SDAS on the multiaxial fatigue behaviour of A356-T6 alloy including mean stress effect", *International Journal of Fatigue*, 80: 90-102, (2015).
12. Ceschini L., Morri A., Toschi S., Johansson S. and Seifeddine S., "Microstructural and mechanical properties characterization of heat treated and overaged cast A354 alloy with various SDAS at room and elevated temperature", *Materials Science & Engineering A*, 648: 340-349, (2015).
13. Watanabe Y. and Oike S., "Formation mechanism of graded composition in Al-Al₂Cu functionally graded materials fabricated by a centrifugal in situ method", *Acta Materialia*, 53: 1631-1641, (2005).
14. Watanabe Y., Hattori Y. and Sato H., "Distribution of microstructure and cooling rate in Al-Al₂Cu functionally graded materials fabricated by a centrifugal method", *Journal of Materials Processing Technology*, 221: 197-204, (2015).
15. Lin X., Liu C. and Xiao H., "Fabrication of Al-Si-Mg functionally graded materials tube reinforced with in situ Si/Mg₂Si particles by centrifugal casting", *Composites: Part B*, 45: 8-21, (2013).
16. Huang X., Liu C., Lv X., Liu G. and Li F., "Aluminum alloy pistons reinforced with SiC fabricated by centrifugal casting", *Journal of Materials Processing Technology*, 211: 1540-1546, (2011).
17. Akar N., Şahin H. M., Yalçın N. and Kocatepe K., "Experimental study on the effect of liquid metal superheat and casting height on interfacial heat transfer coefficient", *Experimental Heat Transfer*, 21(1): 83-98, (2008).
18. Şahin H. M., Kocatepe K., Kayıkcı R. and Akar N., "Determination of Unidirectional Heat Transfer Coefficient during Unsteady-State Solidification at Metal Casting-Chill Interface", *Energy Conversion and Management*, 47(1): 19-34, (2006).
19. Akar N., Boran K. and Hoziklil B., "Effect of Mold Temperature on Heat Transfer Coefficient at Casting-Mold Interface", *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 28(2): 275-282, (2013).

Modeling Of Liquid-Liquid Equilibrium Data and Estimation of New Binary Interaction Parameters for NRTL Model for the Quaternary System Water/ Ethanol/1- Butanol / KCL at 298.15K

Bourayou Euch. N¹, Meniai A-H², Gouaoura A.³

¹Laboratoire de L'Ingénierie des Procédés de L'Environnement (LIPE). Department of Process Engineering University Blida, Blida 9000, Algeria

²Department of Process Engineering , University Constantine, Constantine 25000, Alegria.

³Department of Process Engineering, University Constantine3, Constantine 25000, Alegria.

(Received : 26.09.2016 ; Accepted : 03.11.2016)

ABSTRACT

The present study concerns experimental measurements of the salting-out effect on liquid-liquid phase equilibrium (LLE) of partially miscible systems such as water/ ethanol/1- butanol /Potassium chloride at 298.15K. The salt KCl was used at different mass percentages of 5, 10 and 15. The binodal and tie line data were determined by the cloud point method. The addition of the salt showed to be effective in altering the LLE of water/ ethanol/1- butanol system in favor of the solvent extraction of ethanol from the aqueous solution particularly at high salt concentrations. The experimental data were correlated considering the modified version of the NRTL model for the activity coefficient, with the estimation of new binary interaction parameters corresponding to salt-solvent and solvent-solvent pairs. The deviations between experimental and calculated compositions in both phases for the ternary system using these new interaction parameters showed the ability of NRTL to determine liquid-liquid equilibrium data of the studied systems in the presence of the salts.

Keywords: Salt Effect, Solubility, LLE, NRTL Model, Interaction Parameter.

1. INTRODUCTION

The presence of a salt or a non-volatile solute in a solvent mixture, is of increasing interest due to its influence on separation processes in chemical engineering. The effect of salts addition in distillation had been studied by several investigators. The results have shown that it is possible by the addition of a suitable salt to alter the relative volatility of the system and also avoid the formation of an azeotrope. Similarly, the separation by solvent extraction also becomes increasingly more difficult as the tie-line becomes parallel to the solvent axis leading to a solutropy which has also to be avoided [1-4].

The effect of the addition of a suitable salt or a non-volatile solute can be seen in two ways: graphically, by the variation in the size of the two-phases region as well as by significant changes in the tie-line slopes for a liquid-liquid equilibrium (LLE) mixture, to an extent which eliminates the solutropy, and induces quantitative changes of the solute distribution coefficient and the solvent selectivity. In recent years, liquid-liquid equilibria (LLE) have gained great interest in chemical technology. Due to the energy rising cost, new separation processes based on extraction are getting more attractive. Also it may be feasible to operate known processes at new conditions necessitating checks for liquid phase

stability at various point of the process hence the need for calculating and predicting (LLE) compositions which may be calculated using any excess Gibbs energy model. Santos et al [4] estimated new interaction parameters between binary pairs of salt-solvent and solvent-solvent using NRTL model to correlate the ternary system of water-ethanol-1pentanol in the presence of Potassium bromide (KBr) at 298.15K and 313.15K, in agreement with Stragevitch and Avila [5]. These interactions parameters are functions of the temperature.

Tan's modified NRTL model [6] has shown its ability to predict fairly accurately the effect of salts on the activity coefficient of a solvent component in a solution using the solvent-salt interaction parameters obtained from appropriate boiling point data. A Tan's modified NRTL model has been used to predict the salt effect on (LLE) as in (VLE). The equation can be used to correlate the (LLE) data using the solvent-solvent interaction parameters of the same mixture without salt, at the same temperature. The salt-solvent interaction parameters can be assumed as a function of the salt concentration since the boiling point of a salt-solvent mixture varies with the concentration of the dissolved salt [7]. In this study, the experimental (LLE) of water, ethanol, 1-butanol and potassium chloride at various salt concentrations and at 298.15K were reported. The data were correlated by Tan's modified NRTL model [6], due to its simplicity and its proven quite good prediction of the LLE data

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: bourayou.nabila@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 129-135

2. EXPERIMENTAL

2.1 Materials

Ethanol and 1-butanol were supplied by Merck Eurolab with certified purities higher than 99.5 % and 98.5 %, respectively. This was checked by refractive index measurements at $T=293.15\text{K}$ with an accuracy of $\pm 0.0004n_D$. Densities were also measured using an Anton Paar (model DMA 5000) densimeter with a certified precision of $(\pm 10^{-5} \text{ g cm}^{-3})$. The results were compared to literature data [8].

2.2. Experimental Procedure

Standard curves were determined by using the 'Cloud-Point' method which is described in detail by Letcher and Siswana [9]. The tie lines were determined by the method of the refractive index described in detail by Briggs and Coming [10]. The refractive index of the two phases at equilibrium, represented, respectively, by each extremity of the tie- lines was measured in order to determine their compositions, using the obtained calibration curve and then to draw point by point the equilibrium curves of the considered system. Binodal curves for each system were obtained by preparing binary mixtures of known volumes of the two partially miscible constituents and then by adding gradually the third constituent by means of a burette. The obtained ternary mixture was shaken at room temperature, by means of an agitator provided with a lamp to allow a good observation of the disappearance of the turbidity point, after which a small quantity of the solution was taken to measure the refractive index of each prepared sample by means of the refractometer (Type EUROMEX RD 645) with an accuracy of $\pm 0.0004n_D$.

After the turbidity disappearance the solution was sampled by means of a micropipette to measure the refractive index of each sample.

The binodal curves of the ternary systems were used for the determination of the composition of the phases at equilibrium for various tie-lines for the water/ethanol /1-butanol system at 298.15K. In order to determine experimental liquid-liquid equilibrium data ternary mixtures of solvent, solution and solute of volume equal to 10 ml but with different concentrations were prepared. The mixture was placed in an equilibrium cell, where it was agitated in order to allow an intimate contact between the different phases, and the thermodynamic equilibrium was finally reached by letting the mixture at rest for 24 hours. The complete process was carried out at constant temperature, by using a thermostatic bath. After a necessary rest time, the mixture splitted into two clear and transparent liquid phases with a well defined interface, both phases were then separated by settling. Samples of the organic phase and the aqueous phase were subjected to the measure of the refractive index. The solubility of each constituent in each phase was determined by extrapolation from the binodal curves of the refractive index according to the fraction known for the constituent in the solution.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Experimental Liquid-Liquid Equilibrium Data

The compositions of the different components of Water/ Ethanol/1-Butanol ternary system at 298.15K are presented in Table 2, where X_i denotes the mole fraction of the i^{th} component. Figures 1 to 4 show the corresponding binodal curves of the studied ternary mixtures.

The effect of the added salt amounts on the binodal curves are also shown in these figures where it can be seen that an increase in KCl amount led to an enlargement of the two phases region, inducing an increase of Ethanol and 1-Butanol miscibility.

Table 3 shows the experimental tie-line compositions of the equilibrium phases of the ternary system water/ ethanol/1-butanol at 298.15K. The superscripts I and II denote the organic and the aqueous phases, respectively.

The comparison between the equilibrium data obtained experimentally for the ternary system water/ ethanol/1-butanol at 298. 15K and those previously reported in the literature by Sorensen and Arlt [11] are presented in figure 5. An excellent concordance can be noticed between both results, confirming the reliability of the experimental procedure used in this work as well as the good accuracy.

Table 1. Pure components physical properties at 293.15K and 1 atm

Component	ρ/kgm^{-3}	Refractive index I_{nD}	
		This work from Ref [8]	This work from Ref[8]
Ethanol	0.7890	0.7894	1.3610 1.3605
1-Butanol	0.8100	0.8098	1.3982 1.3981

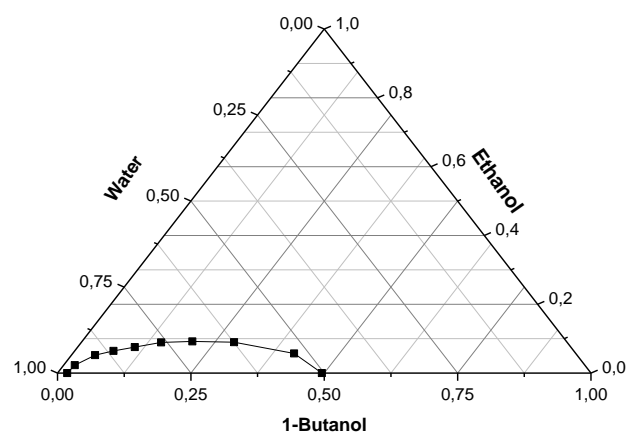


Fig. 1. Binodal curve of Water/Ethanol/1-Butanol system at 298.15K

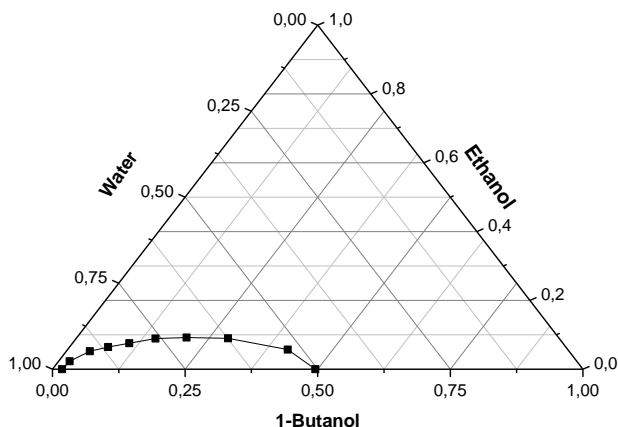


Fig. 2. Binodal curve of Water/Ethanol/1-Butanol/5% KCl system at 298.15K

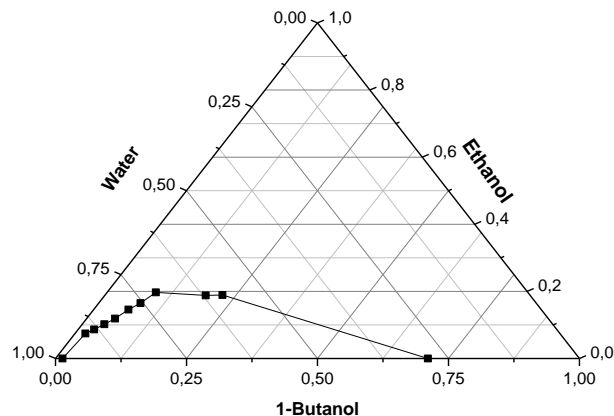


Fig. 4. Binodal curve of Water/Ethanol/1Butanol/15% KCl system at 298.15K

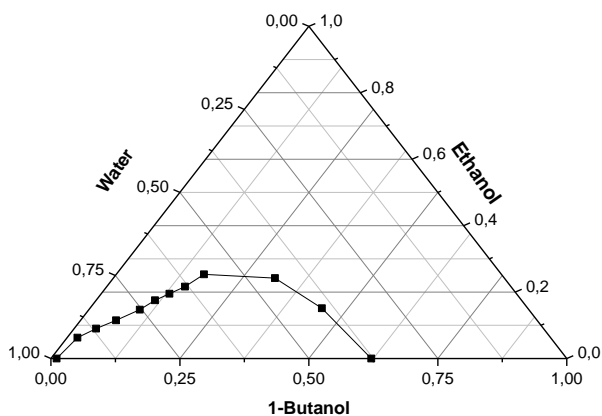


Fig. 3. Binodal curve of Water/Ethanol/1Butanol/10% KCl system at 298.15K

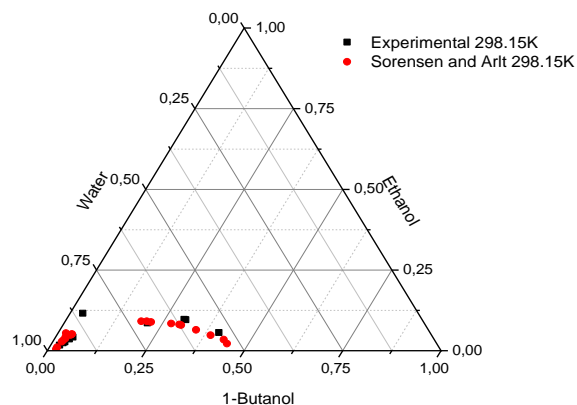


Fig. 5. Experimental LLE of the Water/ Ethanol/ 1-Butanol ternary system at 298.15K

Table 3. Experimental tie-line data for Water/ Ethanol/ 1-Butanol at 298.15K

Organic phase I			Aqueous phase II		
X_{Water}	$X_{Ethanol}$	$X_{1-Butanol}$	X_{Water}	$X_{Ethanol}$	$X_{1-Butanol}$
0.5360	0.0560	0.4080	0.9600	0.0170	0.0230
0.6000	0.0960	0.3040	0.9480	0.0240	0.0280
0.6040	0.0970	0.2990	0.9420	0.0270	0.0310
0.6610	0.0900	0.2490	0.9260	0.0360	0.0380
0.7020	0.0860	0.2110	0.9140	0.0420	0.0440

Table 4. Experimental and prediction tie-line data for Water/ Ethanol/1-Butanol/KCl in a free-salt basis at 298.15K

Organic phase I			Aqueous phase II		
X _{Water}	X _{Ethanol}	X _{1-Butanol}	X _{Water}	X _{Ethanol}	X _{1-Butanol}
5% KCl (X_s=1.205%)					
Experimental data					
0.4646	0.1580	0.3774	0.9503	0.0313	0.0184
0.5219	0.2068	0.2713	0.9224	0.0506	0.027
0.5688	0.2020	0.2292	0.9070	0.0601	0.0329
0.5908	0.1937	0.2155	0.8904	0.0695	0.0401
0.6340	0.1732	0.1928	0.8878	0.0710	0.0412
Predicted using NRTL model					
0.4601	0.1519	0.3880	0.9004	0.0511	0.0485
0.5527	0.1905	0.2568	0.8994	0.0653	0.0352
0.5667	0.1989	0.2343	0.8985	0.0686	0.0329
0.5690	0.2007	0.2340	0.8983	0.0693	0.0324
0.5669	0.1990	0.2302	0.8985	0.0686	0.0328
10% KCl (X_s=2.410%)					
Experimental data					
0.4320	0.1730	0.3953	0.9567	0.0278	0.0154
0.4714	0.2316	0.2970	0.9374	0.0411	0.0214
0.5281	0.2569	0.2148	0.9131	0.0568	0.0301
0.5976	0.2420	0.1602	0.8771	0.0787	0.0441
0.6314	0.2260	0.1425	0.8452	0.0975	0.0571
Predicted using NRTL model					
0.4129	0.1714	0.4158	0.9606	0.034	0.0540
0.4731	0.2223	0.3045	0.9357	0.0513	0.0130
0.5413	0.2446	0.2141	0.8997	0.07	0.0303
0.5939	0.2517	0.1544	0.8506	0.0882	0.0612
0.5987	0.2529	0.1485	0.8478	0.0901	0.0621
15% KCl (X_s=3.620%)					
Experimental data					
0.4986	0.1397	0.3617	0.9702	0.0272	0.0260
0.6030	0.1117	0.2853	0.8809	0.0895	0.0296
0.6396	0.1015	0.2589	0.8371	0.1195	0.0434
0.6473	0.0994	0.2533	0.8256	0.1274	0.0470
0.6742	0.0918	0.2340	0.8141	0.1354	0.0505
Predicted using NRTL model					
0.5965	0.1077	0.3173	0.8618	0.0852	0.0530
0.5987	0.1203	0.2935	0.8521	0.0996	0.0483
0.5982	0.1239	0.2815	0.8453	0.1077	0.0470
0.5975	0.1248	0.2786	0.8430	0.1101	0.0469
0.5980	0.0862	0.2772	0.8430	0.1106	0.0464

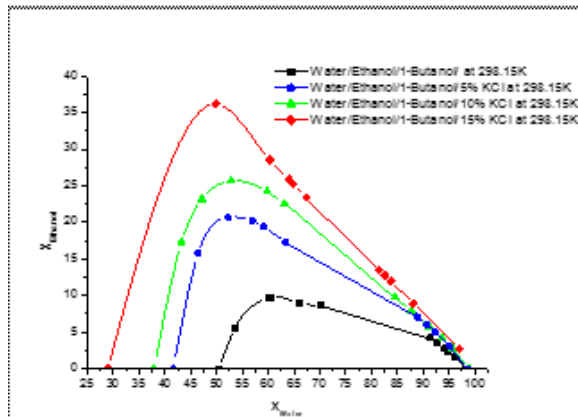


Fig. 6. Experimental LLE of the Water/Ethanol/1-Butanol/KCl system in a free-salt basis at 298.15K

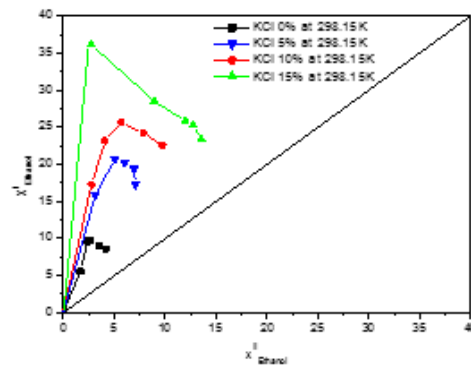


Fig. 7. Distribution curves of Ethanol obtained in different concentration of salt for the Water/Ethanol/1-Butanol/KCl system in a free-salt basis at 298.15K

Figure 6 shows the representation of the effect of the addition of the salt on the water/ethanol/1-butanol system in a free-salt basis at 298.15K, through a pseudoternary diagram. It can be seen from figure 6 that there is an increase in the area of immiscibility on addition of potassium bromide. The salt enlarged the area of the two-phase region; decreased the mutual solubility's of water marginally decreased the concentrations of ethanol and 1-butanol in the aqueous phase while significantly increased the concentrations of the same components in the organic phase. These effects essentially increased the heterogeneity of the system; which is an important consideration in designing a solvent extraction process. One way to analyze the salts effects is to compute the distribution curve of the organic, say ethanol in the present case, between the aqueous and organic phases. Also in order to assess the salt affinity for the aqueous and organic phase's affinity, its distribution curve has been computed. The distribution curves represented in Figure 7 confirm that the addition of potassium chloride actually disrupted the distribution of the ethanol between the 1-butanol and the water. We can see that the distribution curves for each percentage of salt added are always above the first bisector what indicates that the coefficient of distribution (the report enters the quantity of the Ethanol in the organic phase on that in the aqueous phase) is always upper to 1.

3.2. Parameters Estimation And Data Correlation

New binary interaction parameters for the modified version of NRTL model which takes into account the presence of the salt [7], were obtained from the experimentally measured data for the water/ethanol/1-butanol and potassium chloride system at various salt concentrations, by the minimization of the objective function of the squared activity differences for all components and over all the tie-lines, expressed as follows:

$$F = \sum_j \sum_i [(\gamma_i x_i)^I - (\gamma_i x_i)^II]^2$$

where x_i and γ_i represent the mole fraction and the activity coefficient of component, respectively for tie line i , I and II denote the first and second phases in equilibrium respectively. The minimization was performed according to the Simplex search technique modified by Nelder and Mead [12]. The activity coefficient of component i in the absence of salt γ_{i0} is calculate from the following NRTL equation [13]

$$\ln \gamma_{i0} = \left[\frac{\sum_{j=1}^{j=3} \tau_{ji} G_{ji} x_j}{\sum_{k=1}^{k=3} G_{ki} x_k} + \sum_{j=1}^{j=3} \frac{x_j G_{ji}}{\sum_{k=1}^{k=3} G_{ki} x_k} \left(\frac{\sum_{m=1}^{m=3} x_m \tau_{mi}}{\sum_{k=1}^{k=3} G_{kj} x_k} \right) \right] \tau_{ij}$$

Where: $\tau_{ji} = (g_{ji} - g_{ii})/RT$ and $G_{ji} = \exp(-\alpha_{ji} \tau_{ji})$

In which g_{ji} is the energy of interaction between components j and i and α_{ji} the non-randomness factor. All they α_{ji} were assumed to be 0.2 [11]. In a salts-solvents mixture, the activity coefficient γ_{is} of the component i is given by according to [7] as follows:

$$\ln \gamma_{is} = \ln(\gamma_{i0}) + \tau_{is}$$

where τ_{is} is the salt-solvent interaction parameter

The experimental liquid-liquid equilibrium data were correlated, performing liquid-liquid flash calculation. For a ternary system, twelve interaction parameters are necessary and must be calculated. It is about parameters:

$$\tau_{12}, \tau_{13}, \tau_{21}, \tau_{23}, \tau_{31}, \tau_{32}, (\tau_{1s})^I, (\tau_{2s})^I, (\tau_{3s})^I, (\tau_{1s})^{II}, (\tau_{2s})^{II} \text{ et } (\tau_{3s})^{II}.$$

The inaccuracy of the prediction was estimated between the measured and calculated mole fractions using the root-mean square deviation (RMSD) defined as:

$$RMSD = \sqrt{\sum_{k=1}^N \left(\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^3 \frac{(x_{ijk}^{Exp} - x_{ijk}^{Cal})^2}{2N_c N} \right)}$$

Where N and N_c are the numbers of tie-lines and components respectively, x^{Exp} and x^{Cal} are the experimental and calculated mole fraction, respectively, and i, j and $k = 1, 2 \dots N$ (tie-lines) for components, phases and tie lines, respectively.

Group interaction parameters for pair solvent-solvent for the system water/ethanol/1-butanol in the presence of KCl appear in Table 5. Interaction parameters between pair solvent-salt are calculated in every phase organic and aqueous phases in the various concentrations of potassium chloride KCl, appear in Table 6. The interaction parameters between pairs salt-salt were not calculated because mixed-salt.

The correlated results are given in Table 4. In figures 8-10, comparative results between the calculated and experimental data are plotted together, for the quaternary system water/ethanol/1-butanol/KCl at 298.15K

There is a good agreement between the experimental and calculated values. As well as the root-mean square

salt. This study confirmed the great performance of NRTL model.

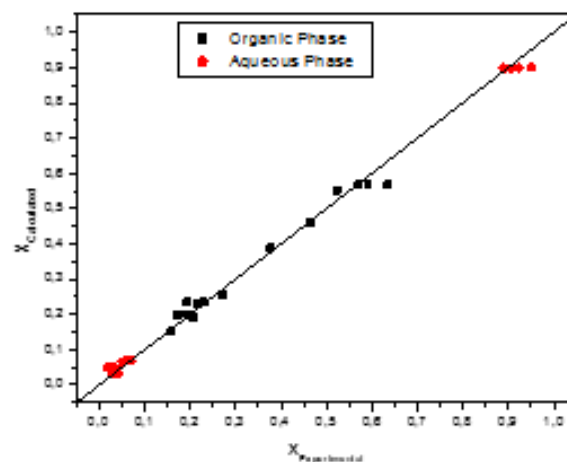


Fig. 8. Comparing the experimental LLE of Water/Ethanol/1-Butanol/ 5%KCl with the equilibria calculated from

Table 5. NRTL binary interaction parameters τ_{ij} for the system Water/Ethanol/1-Butanol /KCl at 298.15K

Concentration (Salt-free basis)(g/100g)	Component (ij)	NRTL parameters		RMSD
		τ_{ij}	τ_{ji}	
5% KCl ($X_S=1.205\%$)	Water-Ethanol	-1.503	-0.832	0.0208
	Water-1Butanol	3.327	4.649	
	Ethanol-1Butanol	17.48	-4.985	
10% KCl ($X_S=2.410\%$)	Water-Ethanol	-0.783	3.285	0.013
	Water-1Butanol	7.835	0.675	
	Ethanol-1Butanol	-2.611	-2.717	
15% KCl ($X_S=3.620\%$)	Water-Ethanol	-0.311	0.201	0.0411
	Water-1Butanol	4.514	0.158	
	Ethanol-1Butanol	4.043	5.743	

Table 6. NRTL binary interaction parameters τ_{is} for the system water/ethanol/1-butanol /KCl at 298.15K

Concentration (Salt-free basis)(g/100g)	Component (is)	NRTL parameters		RMSD
		τ_{is}	τ_{is}	
5% KCl ($X_S=1.205\%$)	Water-KCl	1.265	0.859	0.0208
	Ethanol -KCl	-0.069	1.017	
	1-Butanol-KCl	1.566	-2.576	
10% KCl($X_S=2.410\%$)	Water-KCl	0.847	0.236	0.013
	Ethanol -KCl	2.398	3.71	
	1-Butanol-KCl	1.467	-1.372	
15% KCl ($X_S=3.620\%$)	Water-KCl	4.577	1.232	0.0411
	Ethanol -KCl	0.584	1.243	
	1-Butanol-KCl	1.545	1.89	

deviation (RMSD) for all components are (0.0411, 0.0208). These values show that the NRTL model was able to represent better the equilibrium in the presence of

NRTL model at 298.15K

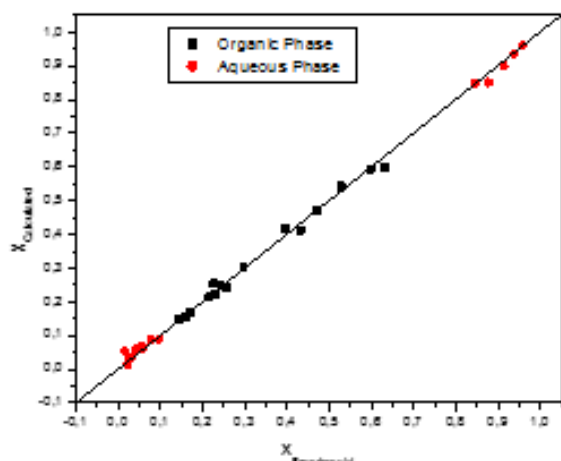


Fig. 9. Comparing the experimental LLE of Water/ Ethanol/ 1-Butanol/ 10%KCl with the equilibria calculated from NRTL model at 298.15K

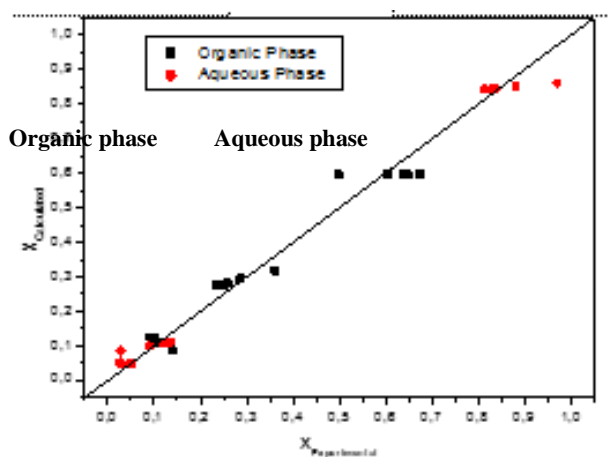


Fig. 10. Comparing the experimental LLE of Water/ Ethanol / 1-Butanol/ 15%KCl with the equilibria calculated from NRTL model at 298.15K

4. CONCLUSION

This study concerned the salting-out effect as applied to solvent extraction systems. Liquid-liquid equilibrium data for the partially systems of Water/ Ethanol/1-Butanol /Salts were experimentally measured at 298.15K and atmospheric pressure. The salt used was potassium chloride at different weight percentages of 10 and 15%.

The binodal and tie-line data results were determined by cloud point measurements method. The addition of salt showed to be effective in modifying the LLE of Water/ Ethanol/1- Butanol system in favor of the solvent extraction of ethanol from aqueous solution with 1-butanol, particularly at high salt concentrations. Potassium chloride increased the area of the two-phase region and decreased the mutual solubilities of 1-butanol

and water and also decreased the concentration of 1-butanol and ethanol in the aqueous phase while significantly increased their concentrations in the organic phase.

The experimental data were correlated considering the modified version of the NRTL model for the activity coefficient, with the estimation of new binary interaction parameters solvent-solvent and solvent-salt.

The deviations between experimental and calculated compositions in both phases for the ternary system using this model were reasonable showing the ability of model NRTL for the determination of LLE of solvents-salt system using the solvent-solvent interaction parameters given on salt-free basis.

REFERENCES

1. Ramana, R. and Subba Reddy. **Salt Effect on Solute Distribution in Liquid-Liquid Equilibria** , 13:9, 79-81, (1978).
2. Narayana, A.S.; Nischal, R.; Patel, R.; Parikh, K.G. and Singh, R.K. Salt Effect in Liquid-liquid Equilibria of Acetic Acid-Water-Benzene System. *J. Chem. Eng. Comm*, 95: 41-46, (1990).
3. Edwin, O.; Eisen and Joseph Joffe.. Salt effects in Liquid-Liquid Equilibria, *J. Chm. Eng.*, 11: 4, (1996).
4. Santos, G.R.; d'Avila, S.G. and Aznar. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*.17: (04-07), 721-734, (2000).
5. Stragevitch, L. and S.G. d'Avila. Application of a generalized Maximum Likelihood Method in the Reduction of Multicomponent Phase Equilibrium Data. *Braz. J. Chem. Eng.*, 41-52, (1997).
6. Tan, T.C.. *Trans. Inst. Chem. Eng., Part A*, 68: 93-103, (1990).
7. Tan, T.C., Aravinth, S. Liquid-Liquid equilibria of water/acetic acid/1-butanol system effect of sodium potassium chloride and correlation. *Fluid Phase Equilibria*, 163: 243- 257, (1999).
8. Yitzhak, M.. *The Properties of Solvents.* , John Wiley and Sons, 4: 239, (1999).
9. Letcher, T. M.; Sizwana, P. M.. Liquid-liquid equilibria for mixtures of alkanol +water + methyl substituted benzene at 25 °C, *Fluid Phase Equilibria*. 74: 203-217, (1992).
10. Briggs, S. W.; Comings, E. W. Tie-line correlations and plait point determination, *Ind. Eng. Chem.*, 35: 411-415, (1943).
11. Sorensen, J.M.; Arlt, W. Liquid-liquid equilibrium data collection. Dechema. *Chemistry data series*, 5(2): (1987).
12. Nelder, J.A.; Mead, R. *Comp*, 7: 7-308, (1965).
13. Renon, H., Prausnitz, J. M. Local Compositions in Thermodynamic Excess Functions for Liquid Mixtures. *AIChE J. USA*, 14(1): 135-441, (1968).

Türk İnşaat Sektöründe Çalışanların Güvenlik Kültürü Düzeyinin ve Güvenlik Performansı ile İlişkisinin İncelenmesi

Serkan YILDIZ* , Mustafa YILMAZ

Kara Harp Okulu Komutanlığı, İnşaat Mühendisliği Bölümü, ANKARA,

(Geliş/Received : 02.08.2016 ; Kabul/Accepted : 18.08.2016)

ÖZ

Türkiye’de iş kazaları, genelde tüm endüstriyel sektörlerin, özeldde inşaat sektörünün en önemli sorunlarından birisi olmaya, bir çok kanuni düzenlemeye rağmen, her yıl ölüm, sürekli işgörmezlik ve yaralanmalarla sonuçlanan binlerce inşaat kazası meydana gelmeye devam etmektedir. Bu durum kazaların sadece teknik bir sorun olarak ele alınmaması gerektiğini ortaya koymaktadır. Gelişmiş ülkelerde, özellikle Çernobil Nükleer kazası ile birlikte iş kazalarında insan faktörüne odaklanılmış, kazaların önemli oranda çalışanların güvensiz davranışlarından kaynaklandığı tespitinden hareketle, çalışmalar güvenlik kültürü ve güvenlik performansı üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Bu çalışmada, Türk inşaat sektöründe çalışanların güvenlik kültürü düzeyi araştırılmıştır. Bu amaçla 4 farklı şehirde bulunan 5 farklı şantiyede, inşaat yönetici ve işçileri arasında bir anket çalışması düzenlenmiş, güvenlik kültürü ile çalışanların değişik demografik özellikleri ve güvenlik performansı arasındaki ilişki incelenmiştir. Çalışma sonuçları doğrultusunda, inşaat sektöründe iş kazalarının önlenmesine yönelik çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Türk İnşaat Sektörü, İş Kazaları, İş Güvenliği, Güvenlik Kültürü.

Investigation of Safety Culture Level Among Turkish Construction Sector Employees and its Relation with Safety Performance

ABSTRACT

Occupational accidents in Turkey, is one of the most important problems generally of all industries particularly of the construction industry. Despite many legal regulations, every year, thousands of construction accidents that result in deaths, injuries and permanent incapacity, continue to occur. This situation reveals that need accidents couldn't be addressed purely as a technical problem .Especially with the Chernobyl nuclear accident, in developed countries, it is focused on human factor and it has been determined that work-related accidents are caused significantly by unsafe behavior of employees. The researchers concentrated their work on safety culture and safety performance. In this study, the level of safety culture of Turkish Construction Sector Employees was investigated. For this purpose a survey was conducted in four different cities and five different construction sites. The relation between safety culture and various demographic characteristics of Turkish construction sector employees and between safety culture and safety performance were investigated. According the results of the study, various proposals have been made to prevent occupational accidents in the construction industry.

Keywords: Turkish Construction Sector, Occupational Accidents, Job Safety, Safety Culture.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen ve ihtiyaçları artan bir ülke olarak Türkiye’de, benzer bir çok ülkede olduğu gibi gelişimin ana eksenini inşaat sektörü oluşturmakta, kentsel mekanlar, barajlar, enerji üretim tesisleri, yollar, havaalanları, fabrikalar, hastaneler ve diğer tüm yaşamsal mekânlar ile o mekânları yaşanılır kılabilecek altyapının temelinde inşaat faaliyetleri bulunmaktadır. Girdi sağlayan diğer sektörlerin katkısı da dikkate alındığında inşaat sektörünün Gayri Safi Milli Hasıla (GSMH) içindeki payı yaklaşık %30 seviyelerine ulaşmaktadır [1]. Öte yandan Türkiye’de çalışma hayatının en önemli sorunlarından birisi

olan iş kazaları, tüm yasal tedbirlere rağmen inşaat sektörünün de olumlu ilerleme kaydedemediği problem sahalarından biri olmaya devam etmektedir.

Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) verilerine göre inşaat işçileri, diğer sektörlerde çalışan işçilere oranla 3-6 kat daha fazla kazaya uğrama riski taşımaktadırlar [2,3]. İnşaat sektörünün, ülkemizin genel teknolojik ve sosyo-ekonomik yapısının yanında projelerin ve işgücünün süreksizliği, işlerin doğal iklim koşullarında, geniş ve dağınık çalışma sahalarında ve değişken çalışma koşulları altında yürütülüyor olması, inşaat işletmelerinin çoğunun küçük ve kurumsallaşmamış firmalar olması, sektörün eğitim ve bilinç düzeyi düşük yoğun insan gücü kullanması [4, 5, 6, 7 ve 8] gibi kendine ve ülkemize has özellikleri, dünyada olduğu gibi Türkiye’de de bu sektörü

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: syildiz@kko.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 137-149

iş kazalarına çok daha açık hale getirmektedir. Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK)'nın 2013 yılı iş kazası istatistiklerine göre, "Bina İnşaatı", "Bina Dışı Yapıların İnşaatı" ve "Özel İnşaat Faaliyetleri" birarada değerlendirildiğinde toplam 26697 kaza ile Türkiye'de en fazla kazanın meydana geldiği sektör inşaat sektörüdür. 2013 yılı içerisinde tüm işgöremezliklerinin yaklaşık %20'si inşaat sektöründe yaşanırken, 2013 yılı içerisinde 459 çalışan sürekli işgörmez hale gelmiş, 521 çalışan ise hayatını kaybetmiştir 2013 yılında Türkiye'de yaşanan tüm iş kazalarının %0.7 si ölümle sonuçlanırken inşaat sektöründe bu oran %1.9 olmuştur [9]. Bir başka bakış açısı ile Türkiye'de 2013 yılında her 1,000 inşaat sektörü çalışanından 15'i iş kazası yaşarken, 10,000 çalışandan 6'sı ya hayatını kaybetmiş yada sürekli iş göremez hale gelmiştir. Öte yandan SGK istatistiklerinin sadece sigortalıların uğradıkları iş kazalarını kapsadığı ve ülkemizde sigortasız çalışmanın yaygın olduğu dikkate alındığında, gerçek iş kazası sayılarının bu rakamların çok ötesine geçeceği ve durumun görünenden daha da vahim olduğu açıktır [10].

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı (ÇSGB) inşaat sektörünü Tehlike Sınıfları Yönetmeliği'ne göre "Çok Tehlikeli İşler" sınıfına alırken [11], iş kazalarıyla mücadele açısından belirlediği öncelikli üç sektör arasına da dahil etmiş [12], bu bilinçle son yıllarda çok sayıda yasal ve kurumsal düzenleme yapılmıştır. Bütün bunlara rağmen, İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) konusunda istenen iyileşme bir türlü sağlanamamaktadır. Bu durum kazaların teknik nedenleri kadar, belki ondan daha fazla olarak insan faktörüne odaklanması gerektiğini ortaya koymaktadır. Gelişmiş ülkelerin özellikle 1986 yılında meydana gelen Çernobil nükleer kazasının ardından başlattığı çalışmalar, kazaların temel olarak çalışanların güvensiz davranışlarından kaynaklandığını göstermiş, bu davranışların ancak güvenlik kültürünün geliştirilmesi ile engellenebileceği ortaya konmuştur.

Güvenli kültürü konusundaki bu farkındalık dünyada bir çok araştırmacıyı, İSG-güvenlik kültürü ilişkisini değişik boyutlarıyla ve farklı sektörler üzerinde çalışmaya itmiştir. Ülkemizde bu konuda yapılan çalışma sayısı kısıtlı olduğu gibi, yazarlar inşaat sektörü ile ilgili yapılmış bu tür bir çalışmaya ise rastlamamıştır. Türk inşaat sektöründe güvenlik kültürü, güvenlik performansı ilişkisinin incelendiği çalışmanın bu açıdan önemli olduğu değerlendirilmektedir. Çalışmanın ilk bölümünde güvenlik kültürü kavramı tanımlanarak, dünya literatüründeki inşaat sektöründe İSG-güvenlik kültürü ilişkisine dair çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde, Türkiye'nin değişik şehirlerindeki şantiyelerde inşaat sektörü çalışanları arasında gerçekleştirilen bir anket çalışması ile çalışanların güvenlik kültürü algı düzeylerinin tespit edilmesine çalışılmış, güvenlik kültürünün demografik değişkenler ve güvenlik performansı ile olan ilişkisi incelenmiştir. Sonuç bölümünde, ülkemiz inşaat sektöründe güvenli çalışma ortamları yaratılmasına katkı sağlamak üzere çeşitli önerilerde bulunulmuştur.

2. GÜVENLİK KÜLTÜRÜ VE İNŞAAT SEKTÖRÜ (SAFETY CULTURE AND CONSTRUCTION SECTOR)

2.1. Güvenlik Kültürü Kavramı (Safety Culture Concept)

İş kazalarının yaklaşık %90'ının çalışanların güvensiz davranışlarından kaynaklandığı görüşü, kazaların oluşmasında insan faktörüne odaklanılmasını sağlamış [13], kazaların ardındaki sosyo-teknik süreçlerin anlaşılmasıyla birlikte kaza süreci teorileri örgütsel süreçleri ve psiko-sosyal etkileri kapsayacak şekilde genişletilmiştir [14]. Büyük felaketlere ilişkin vaka çalışmaları örgütsel kazaları güvenlik kültürü zayıflığına bağlarken, günümüzde bireysel kazaları açıklamak için de güvenlik kültürü kavramı yaygın bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [15].

Güvenlik kültürü, bir grup insan tarafından paylaşılan, soyut (inanç ve değerler) unsurlarla, bu soyut unsurları taşıyan, daha görünür yüzeydeki somut semboller ve uygulamaları içeren paylaşılmış bir olgu şeklinde tanımlanan [16] örgüt kültürünün bir parçası olarak karşımıza çıkmaktadır. Tehlikeli sektörlerde örgüt kültürünün genellikle ilişkilendirilmesi ile ortaya çıkan güvenlik kültürü içinde gruplar ve bireylerin işlev gördüğü, ulusal, örgütsel ve mesleki tutum ve değerlerin meydana getirdiği karmaşık bir çerçeve [17] veya Turner'ın ifadesi ile çalışanların, yöneticilerin, müşterilerin veya halkın tehlikeli veya yaralayıcı durumlara maruz kalmasını en aza indirmek için geliştirilen inançlar, normlar, tutumlar, roller, sosyal ve teknik uygulamalar kümesidir [18]. Güvenlik kültürünün, güvenlik ve sağlık performansına önemli oranda katkı sağladığına inanç her geçen gün büyümekte ve kavram geniş bir yelpazedeki bir çok sektörün daha fazla ilgisini çekmektedir [19].

Güvenlik kültürünün amaçları, kaza ve yaralanmaları azaltmaya yönelik risk, kaza ve hastalıklar hakkında aynı inanç ve fikirlerin paylaşılmasını sağlayarak davranış normları oluşturmak, dikkat çeken konular hakkında gereken güvenliği sağlamak, güvenlik konularında ilgi ve katılımı arttırarak kişilerin güvenliğe bağlılığını sağlamak, örgütün sahip olduğu sağlık ve güvenlik programının biçim ve yeterliğine karar vermek ve iş güvenliğine dair gerçekleştirilen uygulamaların tarzını ve becerilerini belirlemek şeklinde ifade edilmektedir [20]. Örgüt üyelerinin güvenliğe yönelik olarak paylaştıkları davranış kalıpları, tutumları, algılar ve değerler kümesi olarak ifade edilen pozitif güvenlik kültürü çalışanların güvenli olmayan eylemlerden sakındığı bir çalışma atmosferi yaratmaktadır [21].

2.2. İnşaat Sektöründe Güvenlik Kültürüne İlişkin Çalışmalar (Studies on Safety Culture in Construction Sector)

İş kazalarının mümkün olduğunca azaltılmasında pozitif bir güvenlik kültürü ve güvenlik iklimi yaratılmasının önemi günümüzde inşaat sektöründe de anlaşılmaya başlanmıştır [22]. Artık yetkililer kültürün bir inşaat organizasyonun tüm seviyelerinde güvenlik hususlarını

güçlendiren ve destekleyen olumlu bir faktör olarak rol oynayabileceği gibi, güvenliğin öncesine verimliliği yerleştiren, işçi yaralanmalarını inşaat sektörünün kaçınılmaz bir parçası olarak kabul eden ve bu duruma tolerans gösteren olumsuz bir rol oynayabileceğinin farkına varmaktadır. Şantiyenin olağanüstü güvenli ya da son derece tehlikeli olup olmadığı, yönetimin ve işçilerin güvenliğe ve tehlikelere yaklaşım ve tutumlarını yansıtan güvenlik kültürünün bir sonucudur. Bu bağlamda, işin fiziksel ve organizasyonel koşulları, güvenlik kültürünün yansımaları olarak karşımıza çıkmaktadır. Kısaca, şantiyelerde "İnşaat tehlikeli bir iştir - kaza olur"dan "Güvenlik ve sağlık, işimizi nasıl gerçekleştirdiğimizdir"e uzanan örtülü veya açık örgütsel güvenlik mesajları ile karşılaşmak mümkündür [23].

Türkiye’de konuya ilişkin değişik sektörler üzerinde yapılmış bazı çalışmalar bulunmakla birlikte, inşaat sektörü üzerinde yapılmış bir çalışmaya rastlanmamıştır. Oysa başta projelerin ve işgücünün süreksizliği olmak üzere, inşaat sektörünün kendine has bir çok özelliği nedeniyle, diğer sektörler üzerinde yapılmış çalışmalarının inşaat sektörüne genellenmesi mümkün gözükmemektedir. Öte yandan dünya literatüründe inşaat sektörüne yönelik çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genel olarak değişik güvenlik kültürü boyutları ile çalışanların güvenlik performansları arasındaki ilişki ele alınmıştır. Söz konusu çalışmalar, ayrıntıları 3 üncü bölümde verilen bu araştırmanın konusu olan güvenlik kültürü boyutlarından hangilerinin ele alındığına göre incelenmiştir. Çalışmalarda ele alınan güvenlik kültürü boyutları, güvenlik performansının nasıl ölçüldüğü, izlenen metotlar ve elde edilen sonuçlara ilişkin genel bilgiler Çizelge 1’de sunulmuştur.

Çizelge 1. İnşaat sektöründe güvenlik kültürü güvenlik performansı ilişkisine dair çalışmalar (Studies on safety culture safety performance relation, in the construction sector)

Araştırma	İncelenen Güvenlik Kültürü Boyutu										Güv. Perf. Ölç.	Araştırmanın Yöntemi	Araştırma Sonucu
	Yönetimin Bağlılığı	Güvenlik Önceliği	Güvenlik İhtiyacı	Güvenlik Eğitimi	Farkındalık ve Yetkinlik	Çalışanların Katılımı	Kadercilik	Raporlama Kültürü	İş Kazasına Maruziyet	Güvenli Davranış			
Gillen vd. [24]	X	X		X	X	X	X				X	Kaliforniya’da inşaat kazasında yaralanmış sendikacı ve sendikası 255 inşaat işçisi ile anket çalışması	Yönetimin bağlılığı, güvenlik farkındalığı, güvenlik eğitimi ve kadercilik boyutlarında sendikacı ve sendikası çalışanlar arasında farklılık, güvenlik iklimi skorları ile yaralanma derecesi arasında önemli korelasyon tespit edilmiştir.
Melia vd. [25]	X	X		X	X	X	X				X	İngiltere ve İspanya’dan toplam 982 genel örneklem ile Çin ve İspanya’dan 473 inşaat sektörü çalışan ile anket çalışması	Yönetici ve çalışan düzeyinde güvenlik tepkilerine ve risk algısına ilişkin karakteristik farklılıklar olduğu tespit edilmiştir.
Lingard [26]				X	X						X	Avustralya’da ilk yardım eğitiminin güvenlik motivasyonuna etkisine dair 24 haftalık bir deneysel çalışma	Eğitim sayesinde çalışanların farkındalığının artmasının güvenlik ve sağlıkla ilgili yaklaşımlarını pozitif yönde etkilediği sonucuna ulaşılmıştır.
Mohamed [27]	X										X	Avustralya’da 36 inşaat firmasının yöneticileri ile bir anket çalışması	Güvenlik performansı, proaktivite ve güvenlik kaydı ile güvenlik yönetimi bağlılığı arasında pozitif bir ilişki olmadığı tespit edilmiştir
Mohamed [28]	X	X	X	X	X	X	X				X	Avustralya’da 10 farklı şantiyeden 68 kişinin katıldığı anket ile toplanan verilerin yapısal eşitlik modellemesi ile değerlendirilmesi	Pozitif güvenlik iklimine ulaşılmasında yönetimin bağlılığı, iletişim, çalışanların katılımı, davranış ve yetkinliklerinin önemli olduğu belirlenmiştir.
Siu vd. [29]	X	X	X		X	X	X				X	Hong Kong’da 27 farklı inşaat şantiyesinde, toplam 374 inşaat çalışanı ile anket çalışması	Güvenlik tutumlarının ve psikolojik zorlanmanın kaza oranlarını anlamlı şekilde açıkladığı tespit edilmiştir. İletişim ile güvenlik performansı ilişkisi anlamsız bulunmuştur.

3. ARAŞTIRMA (RESEARCH)

3.1. Araştırmanın Amacı ve Hipotezleri (Purpose and Hypotheses of Research)

Araştırmada inşaat sektörü çalışanlarının güvenlik kültürü algılarının, farklı demografik değişkenlerle olan ilişkisi ile güvenlik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda medeni durum, eğitim düzeyi, yaş, tecrübe, yönetici olup olmama ve şantiye ortamının güvenlik kültürü algısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Güvenlik kültürü algısının güvenlik performansı üzerindeki etkisi üç hipotez üzerinden incelenmiştir. Bunlar;

- Güvenlik kültürü düzeyi ile iş kazasına maruz kalma arasında bir ilişki vardır,
- Güvenlik kültürü değişkenleri ile güvenliğe uyma davranışı arasında ilişki vardır,
- Güvenlik kültürü değişkenleri ile çalışanların güvenliğe katılma davranışları arasında bir ilişki vardır hipotezleri olmuştur.

3.2. Araştırmanın Metodolojisi (Research Methodology)

3.2.1. Araştırmada Kullanılan Anket Formu (Survey Form Used in the Research)

İkinci bölümünde değinildiği üzere, güvenlik kültürünün ölçümünde niceliksel ve niteliksel yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada çalışanların güvenlik kültürü algıları ve güvenlik performansını niceliksel olarak ölçmek üzere, Çizelge 2’de sunulan sorulardan oluşan bir anket formu kullanılmıştır. Güvenlik kültürü anketinde 8 boyuta yer verilmiş, güvenlik performansı ise iş kazasına maruz kalma ile güvenlik uyumu ve güvenlik katılımı olmak üzere iki alt boyuttan oluşan güvenli davranış ölçeği

Çizelge 1 Devam. İnşaat sektöründe güvenlik kültürü güvenlik performansı ilişkisine daire çalışmalar (Studies on safety culture safety performance relation, in the construction sector)

Araştırma	İncelenen Güvenlik Kültürü Boyutu										Güv. Perf. Ölç.	Araştırmanın Yöntemi	Araştırma Sonucu
	Yönetimin Bağlılığı	Güvenlik Önceliği	Güvenlik İletişimi	Güvenlik Eğitimi	Farkındalık ve Yetkinlik	Çalışanların Katılımı	Kadercilik	Raporlama Kültürü	İş Kazasına Maruziyet	Güvenli Davranış			
Shoji ve Egawa [30]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		Japonya'daki şantiyelerde 300 ustabaşı ve 300 çalışan ile özdeğerlendirme anketi	Güvenlik iklimine ilişkin sekiz faktör ile 4 pozitif ve 4 negatif çalışan güvenlik davranışı tespit etmişlerdir.
Burt vd. [31]							X					Orman, inşaat ve enerji üretim işçileri ile, ilk aşamaya 8 farklı şirketten 80, ikinci aşamaya 2 farklı şirketten 104 çalışanın katılımı ile anket çalışması	Meslektaşlarının güvenliğini önemsemenin takım güvenliği ruhu ile pozitif ilişkisini ortaya koymuştur
Törner ve Pousette [32]												İsveç inşaat projelerinden 5 işçi güvenlik temsilcisi ve 19 ilk kademe yöneticisi ile görüşmeler yapılması	Güvenlik prosedürlerine ilişkin dört kategori bulunmuştur: İşin doğası; organizasyon ve yapılar; güvenlik kültürüne ilişkin değerler; bireysel yetenek ve yaklaşımlar.
Gittleman vd. [33]	X	X		X			X				X	Las Vegas inşaat projelerinde yönetici, ustabaşı ve işçilerden oluşan toplam 5480 kişi ile anket çalışması	Güvenlik iklimine yönelik yöneticilerin daha pozitif bir algısı bulunduğu tespit edilmiştir.
Fung vd. [34]	X		X		X	X	X	X			X	Kamu ve özel inşaat firmalarında çalışan 61 yönetici, 103 amir/nezaretçi ve 259 işçi olmak üzere toplam 423 kişi ile anket çalışması	Yönetim kademesinde çalışanların güvenlik algısı, örgütsel bağlılık ve iletişim, kaza raporlama, kısım yönetiminin bağlılığı, kişisel rol ve iş arkadaşlarının etkisi boyutlarında, çalışanlardan daha yüksek bulunmuştur.
Zhou vd. [35]											X	2004 (N=626) ve 2007 (N=621) yılları arasında Çin inşaat sektöründe 4 farklı işyerinde anket çalışması	2007 yılında 2004 yılına göre her bir güvenlik iklimi boyutları ortalaması anlamlı bir artış göstermiştir.
Goldenhar vd. [36]	X	X		X	X						X	ABD'de inşaat işçileri sendikasına üye olan 591 kişi ile anket çalışması	Güvenlik iklimi ile yaralanmalar arasında negatif, güvenlik uyumu arasında pozitif yönlü anlamlı bir ilişki bulunmuştur.

ile ölçülmüştür. Anket tamamı 5 li likert ölçeğine göre hiç katılmıyorum ve tamamen katılıyorum arasında değişen cevaplarla değerlendirilen ve olumlu yönde görüş içeren toplam 47 sorudan oluşmuştur.

Anketin ilk bölümünde çalışanların yaş, cinsiyet, medeni durum, eğitim durumu, işteki konumu, iş tecrübesi ve firmada çalışma yılı, meslek hayatlarında ve mevcut firmalarında iş kazası veya ramak kaza geçirip geçirmediikleri sorularından oluşan kişisel bilgi formuna yer verilmiştir.

Çizelge 2. Anket formunda yer verilen güvenlik kültürü boyutları ve sorular (Safety culture dimensions and the questions given in the survey form)

Güvenlik Kültürü Boyutu ve Ölçeğin Ana Kaynağı [37]	Soru
Yönetimin Bağlılığı (Muniz, Peon ve Ordas (2007) ölçeği)	1. Yöneticiler çalışanların katılımını, güvenlik için temel olarak görmektedirler.
	2. Yöneticiler, çalışanların eğitimini güvenlik için esas olarak görmektedirler.
	3. Yöneticiler örgüt içi iletişimi güvenlik için esas olarak görmektedirler.
	4. Yöneticiler, faaliyetlerin izlenmesini temel olarak görmektedirler.
	5. Yöneticiler, sağlık ve güvenlik konularında da sorumluluk almaktadırlar.
	6. Yöneticiler aktif olarak güvenlik konularında öncülük etmektedirler.
	7. Yöneticiler, düzenli olarak iş yerlerini ziyaret etmektedirler.
	8. Yöneticiler, güvenlik konuları için toplantılar düzenlemeyi teşvik etmektedirler.
Güvenlik Önceliği (Cox ve Cheyne (2000) ölçeği)	9. Yönetim, çalışanların güvenliğinin büyük bir önemi olduğunu düşünmektedir
	10. Güvenlik meselelerine yüksek bir öncelik verilmektedir.
	11. Güvenlik prosedürleri dikkatli bir şekilde takip edilmektedir.

Güvenlik İletişimi (Neal, Griffin ve Hart (2000) ölçeği)	12. Yönetim güvenliğinin üretimle eş bir öneme sahip olduğunu düşünmektedir.
	13. Bu işyerinde güvenlik konuları hakkında yoğun bir iletişim vardır.
	14. Çalışanlar güvenlik konuları hakkında üst yönetimle müzakere edebilir.
	15. Toplantılarda güvenlik konularına değinmek için yeterince fırsat vardır.
Güvenlik Eğitimi (Neal, Griffin ve Hart (2000) ölçeği)	16. Bu işyerinde güvenlik konuları hakkında açık bir iletişim vardır.
	17. Çalışanların düzenli olarak işyeri sağlık ve güvenlik konuları hakkında fikri alınır.
	18. Eğitim programlarında güvenlik konularına yüksek bir öncelik verilir.
	19. Güvenlik eğitimi çalışanların işlerinde karşılaştıkları çeşitli durumları kapsar.
Güvenlik Farkındalığı/ Yetkinlik (Lin vd. (2008) ölçeği)	20. Çalışanlar işyerinde sağlık ve güvenlik konularında kapsamlı eğitim alır.
	21. Çalışanlar işyerinde sağlık ve eğitim programlarına yeterince ulaşabilir.
	22. İşyerimde güvenlik konusunda sorumluluklarımın ne olduğunu biliyorum.
	23. İşimin gerektirdiği güvenlik kurallarını anlıyorum.
Çalışanların Katılımı (Muniz, Peon ve Ordas (2007) ölçeği)	24. İş yerimdeki güvenlik sorunlarıyla baş edebiliyorum.
	25. Güvenlik kurallarına her zaman uyuyorum.
	26. Çalışırken güvenliğinin en önemli şey olduğunu düşünüyorum.
	27. Çalışanlar talimatnameler ve prosedürlerin hazırlanmasına katılmaktadırlar.
Kadercilik	28. Çalışanlar güvenlik planının düzenlenmesi ve uygulanmasına aktif katılım sağlar.
	29. Çalışanlar güvenlik yönetmeliklerine uymaktadırlar.
	30. Çalışanlar çalışma koşullarındaki noksanlar için yazılı önerilerde bulunuyorlar.
	31. Kazalar aniden olur ve önlemek için yapabilecek çok az şey vardır.

(Rundmo ve Hale (1999) ölçeği)	32. Çalışırken başımıza ne geleceği büyük ölçüde şans meselesidir.
	33. Kazalar kaçınılmazdır.
	34. Bir kazadan kaçınmanız imkânsızdır.
	35. Makinelerin ve teknik ekipmanların kullanımı kazaları kaçınılmaz kılar.
	36. Şirketin çabalarına rağmen kazaların önlenmesi kaçınılmaz görünüyor.
Raporlama Kültürü (Havold ve Nesset (2009) ölçeği)	37. Biz, şirketimizde her zaman kazaları ve olayları bildiriyoruz.
	38. Emniyetsiz koşulları bildirmeye teşvik ediliyorum.
	39. Kazaların/olayların bildirilmesi organizasyonumuzda güvenli çalışmada önemlidir.
	40. Çalışanlar kıl payı atlatılan kazaları (ramak kala kazaları) bildirmeye isteklidir.
	41. Çalışanlar kazaları bildirmeye isteklidir.
Güvenli Davranış Ölçeği (Güvenlik Uyumu/)	42. İşimi yaptığım esnada bütün gerekli güvenlik ekipmanlarını kullanırım.
	43. İşimi yaparken uygun güvenlik prosedürlerini kullanırım.
	44. İşimi yaptığım esnada en yüksek güvenlik seviyelerini sağlarım.
	45. İşyeri içinde güvenlik programlarını teşvik ederim.
Güvenlik Katılımı (Neal, Griffin ve Hart (2000) ölçeği)	46. İşyeri güvenliğinin iyileştirilmesi için fazladan çaba harcarım.
	47. İşyeri güvenliğinin iyileştirilmesine yönelik görevleri gönüllü olarak yaparım.

3.2.2. Anketin uygulanması ve analizi (Survey implementation and analysis)

Araştırma, Ankara'da 2, Sivas, Diyarbakır ve Malatya'da 1'er olmak üzere 5 farklı şantiyede gerçekleştirilmiştir. Bu şantiyelerin tamamında farklı büyüklüklerde tek bir bina inşası ve benzer üstyapı inşaatı imalatları söz konusu

Çizelge 3. Katılımcıların cinsiyet, medeni durum ve işteki konumuna göre dağılımları (Distribution according to gender, marital status and position)

	Cinsiyet		Medeni Durum		İşteki Konum		
	Erkek	Kadın	Evli	Bekar	Yönetici	Çalışan	Toplam
N	119	3	75	47	16	106	122
%	97,5	2,5	61,5	38,5	13,1	86,9	100

Çizelge 4. Katılımcıların yaş gruplarına göre dağılımları (Distribution according to age)

Yaş Grubu	N	%
18-29	44	36,1
30-39	45	36,9
40-49	24	19,7
50 ve üzeri	9	7,4
Toplam	122	100,0

Çizelge 5. Katılımcıların eğitim seviyesine göre dağılımları (Distribution according to level of education)

Eğitim Durumu	N	%
Okur-Yazar	9	7,4
İlköğretim	62	50,8
Lise ve dengi	32	26,2
Üniversite	19	15,6
Toplam	122	100,0

iken, Ankara'da inşa edilen binaların kullanım alanları diğerlerine daha büyüktür. Çalışmanın gerçekleştirildiği şantiyelerden, Ankara'da sözleşme bedelleri 35 ve 20 milyon TL olan iki farklı eğitim tesisi, Sivas'ta yaklaşık 3 milyon TL bedelli karargah binası, Diyarbakır'da yaklaşık 1 milyon TL bedelli hizmet binası ve Malatya'da 1.5 milyon TL bedelli destek binası inşası gerçekleştirilmektedir. Ankara'daki şantiyelerde sürekli iş güvenliği uzmanı bulunmakla birlikte, 5 firmanında genel olarak kurumsal yapısının zayıf olduğu, hem teknik personelin hem de çalışanların firma bünyesinde sürekli değil proje bazlı istihdam edildiği tespit edilmiştir.

Şantiyede bulunan kontrol mühendisleri vasıtası ile uygulanan toplam 137 anket formundan 15'i eksik veri içerdiği için kapsam dışında bırakılmış, analiz ve değerlendirmeler 122 anket formu üzerinden gerçekleştirilmiştir. Toplanan verilerin analizi SPSS 21.0 (Statistical Package for Social Sciences- Sosyal Bilimler için İstatistik Paketi) [38] programı ile gerçekleştirilmiş, betimleyici analiz, güvenilirlik analizi, t-testi, varyans analizi, korelasyon ve regresyon analizleri yapılmıştır.

3.3. Araştırmadan Elde Edilen Bulgular (Research Findings)

3.3.1. Demografik bulgular (Demographic findings)

Katılımcılara ait demografik bulgular Çizelge 3-8'de verilmiştir. Buna göre tamamına yakını erkek olan katılımcıların yaklaşık % 60'ı evlidir. Ağırlıklı olarak 18-40 yaşlarında olan çalışanların % 50'si ilköğretim mezundur. % 10'u hayatı boyunca enaz bir iş kazası yaşamış, % 15'i ise mevcut işyerinde iş kazasına veya ramak kala olayına maruz kalmıştır.

Çizelge 6. Katılımcıların iş tecrübelerine göre dağılımları (Distribution according to work experience)

Yaş Grubu	N	%
0-2 Yıl	18	15,5
3-9 Yıl	37	31,9
10-19 Yıl	37	31,9
20 yıl ve üstü	24	20,7
Toplam	116	100,0

Çizelge 7. Katılımcıların iş kazası ve ramak kala durumu dağılımları (Distribution according to work accident)

Kaza Durumu	Hayatı Boyunca İş Kazası		Mevcut İşyeri İş Kazası		Ramak Kala veya Toplam
	Evet	Hayır	Evet	Hayır	
N	13	109	19	103	122
%	10,7	89,3	15,6	84,4	100,0

Çizelge 8. Katılımcıların şantiyelere göre dağılımları (Distribution according to sites)

Şantiye Yeri	N	%
Ankara-1	14	11,5
Ankara-2	39	32,0
Diyarbakır	24	19,7
Malatya	31	25,4
Sivas	14	11,5
Toplam	122	100,0

3.3.2. Kullanılan ölçeklerle ilgili tanımlayıcı istatistikler ve güvenilirlik analizi sonuçları (Descriptive statistics on the scales and results of reliability analysis)

Araştırmada kullanılan ölçeklerle ilgili tanımlayıcı istatistiklere ilişkin sonuçlar ve güvenilirlik katsayıları Çizelge 9'da verilmiştir. Sorulara verilen cevapların ortalaması 3 ile 4 arasında değişmekte, yani kararsızım ile katılıyorum arasında gerçekleşmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere, ölçeklerin güvenilirlik değerleri 0,83 ile 0,93 arasındadır. Bu değerler, Cronbach ve Helmstater'in önerdiği 0,5 ve Bowling ve Shah'ın önerdiği 0,7 olan

sınır değerlerin oldukça üzerinde çıkarak, ölçeğin güvenilir olduğunu göstermiştir [39;41].

Demografik değişkenler ile güvenlik kültürü değişkenleri arasındaki ilişkiler: Çizelge 10 çalışanların medeni durumlarına göre güvenlik kültürü değişkenlerinin ortalamalarını göstermektedir. Çizelgede evlilere ait ortalamalar tüm boyutlarda bekârların ortalamalarından daha yüksek çıkmıştır. Mann-Whitney U testi ile tüm boyutlarda medeni durum kategorileri açısından farklılık bulunmadığı şeklindeki hipotezler test edilmiş, sadece kadercilik ve güvenlik iletişimi boyutlarında hipotez reddedilmiştir ($p < 0,05$). Buna göre

Çizelge 9. Ölçeklerin güvenilirlik katsayıları (Reliability coefficients of scales)

Değişken	N	Madde Sayısı	Ort.	St.Sap.	Soru Ort. P.	C.Alph	C.Alph*
Yöneticilerin Tutumları	122	4	14,06	4,206	3,52	0,90	0,84
Yöneticilerin Davranışları	122	4	14,36	4,227	3,59	0,88	0,83
Güvenlik Önceliği	122	4	14,94	4,224	3,74	0,89	0,72
Güvenlik İletişimi	122	5	18,58	5,162	3,71	0,93	-
Güvenlik Eğitimi	122	4	14,60	4,499	3,65	0,95	-
Güvenlik Farkındalığı	122	5	19,83	4,737	3,97	0,90	0,83
Çalışanların Katılımı	122	4	14,30	4,312	3,58	0,88	0,76
Kadercilik	122	6	18,57	7,264	3,10	0,90	0,76
Raporlama Kültürü	122	5	18,54	5,242	3,71	0,89	0,76
Güvenlik Uyumu	122	3	11,80	3,041	3,93	0,93	0,94
Güvenlik Katılımı	122	3	11,45	3,015	3,82	0,83	0,85

* Ölçeklerin orijinalindeki güvenilirlik değerleridir [37].

bu iki boyutta evli ve bekarlar için anlamlı farklılık söz konusudur.

eğitimsiz (okur yazar) grubun ortalaması yüksek çıkarken, üniversitelilere ilişkin ortalamalar daha düşük

Çizelge 10. Medeni durum güvenlik kültürü ilişkisi (Marital status safety culture relationship)

Ölçekler	Evli			Bekar			Mann-Whitney U Testi	
	N	M	SS	N	M	SS	Sig	Karar
Yöneticilerin Tutumları	75	3,57	,97	47	3,43	1,17	,561	Kabul
Yöneticilerin Davranışları		3,63	,97		3,52	1,19	,702	Kabul
Güvenlik Önceliği		3,80	1,04		3,64	1,08	,428	Kabul
Güvenlik İletişimi		3,87	1,02		3,48	1,02	,031	Red
Güvenlik Eğitimi		3,79	1,10		3,43	1,14	,079	Kabul
Güvenlik Farkındalığı		4,00	,88		3,91	1,05	,868	Kabul
Çalışanların Katılımı		3,60	1,08		3,54	1,08	,737	Kabul
Kadercilik		3,31	1,17		2,75	1,20	,019	Red
Raporlama Kültürü		3,78	,99		3,59	1,13	,502	Kabul

Çizelge 11'de katılımcıların eğitim seviyesine göre değişik güvenlik kültürü boyutları açısından anlamlı fark bulunup bulunmadığına ilişkin Kruskal Wallis test sonuçları verilmiştir. Genel olarak bütün boyutlarda daha

çıkıştır. Bu durumun eğitim seviyesi arttıkça konuya daha gerçekçi yaklaşılmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, bütün boyutlar içerisinde yalnızca kadercilik ve raporlama kültürü için

Çizelge 11. Eğitim seviyesi güvenlik kültürü ilişkisi (Education level safety culture relationship)

Ölçekler	Eğitim Durumu	Kruskal Wallis Testi					
		N	M	SS	Chi-Square	df	Asymp. Sig.
Yöneticilerin Tutumları	Okur Yazar	9	3,94	,62	2,435	3	,487
	İlköğretim	62	3,51	1,03			
	Lise ve dengi	32	3,60	,98			
	Üniversite	19	3,47	1,37			
Yöneticilerin Davranışları	Okur Yazar	9	4,08	,72	4,016	3	,260
	İlköğretim	62	3,48	1,02			
	Lise ve dengi	32	3,77	,98			
	Üniversite	19	3,43	1,37			
Güvenlik Önceliği	Okur Yazar	9	4,47	,48	6,662	3	,084
	İlköğretim	62	3,57	1,08			
	Lise ve dengi	32	3,93	,88			
	Üniversite	19	3,41	1,26			
Güvenlik İletişimi	Okur Yazar	9	4,51	,60	6,843	3	,077
	İlköğretim	62	3,60	1,07			
	Lise ve dengi	32	3,75	,93			
	Üniversite	19	3,64	1,14			
Güvenlik Farkındalığı	Okur Yazar	9	4,20	,46	4,571	3	,206
	İlköğretim	62	3,79	1,02			
	Lise ve dengi	32	4,16	,83			
	Üniversite	19	4,11	,99			
Güvenlik Eğitimi	Okur Yazar	9	4,38	,57	3,849	3	,278
	İlköğretim	62	3,56	1,18			
	Lise ve dengi	32	3,72	,89			
	Üniversite	19	3,43	1,37			
Çalışanların Katılımı	Okur Yazar	9	4,03	,65	3,282	3	,350
	İlköğretim	62	3,53	1,12			
	Lise ve dengi	32	3,76	,87			
	Üniversite	19	3,18	1,32			
Kadercilik	Okur Yazar	9	4,09	,90	11,491	3	,009
	İlköğretim	62	3,20	1,12			
	Lise ve dengi	32	2,96	1,19			
	Üniversite	19	2,48	1,33			
Raporlama Kültürü	Okur Yazar	9	4,73	,36	13,903	3	,003
	İlköğretim	62	3,55	1,05			
	Lise ve dengi	32	3,87	,85			
	Üniversite	19	3,47	1,27			

eğitim seviyesine göre istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir ($p < 0,05$).

Çizelge 12'de değişik güvenlik kültürü boyutlarında şantiyelere göre anlamlı fark bulunup bulunmadığına ilişkin Kruskal Wallis test sonuçları verilmiştir. Buna göre gü-

Çizelge 13'de güvenlik kültürü değişkenleri ile işteki konum ilişkisi incelenmiştir. Buna göre yöneticilerin tutumları, yöneticilerin davranışları, güvenlik eğitimi, güvenlik farkındalığı, çalışanların katılımı ve raporlama kültürü boyutlarında katılımcıların konumları açısından

Çizelge 12. Şantiyelere göre güvenlik kültürü algısı (Safety culture perception according to the sites)

	yönetici tutumu	yönetici davranışı	güvenlik önceliği	güvenlik iletişimi	güvenlik eğitimi	güvenlik farkındal.	çalışan katılımı	kadercilik	raporlama
Chi-Square	6,823	5,588	8,102	17,045	14,850	9,227	11,572	23,422	14,726
df	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Asymp. Sig.	,146	,232	,088	,002	,005	,050	,021	,000	,005

venlik iletişimi, güvenlik eğitimi, güvenlik farkındalığı, çalışan katılımı, kadercilik ve raporlama kültürü için şantiyeler arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir ($p < 0,05$). Bu boyutlarda Ankara'da bulunan iki farklı şantiye dışındaki diğer şantiyeler arasında genel olarak anlamlı farklılıklar olduğu görülmüştür. Bu durum şantiyelerdeki güvenlik ikliminden kaynaklanacağı gibi çalışanların memleketlerine has özelliklerinden kaynaklanma ihtimali de bulunmaktadır. Konu bu anlamda başka çalışmalarla daha ayrıntılı incelenmelidir.

fark yoktur hipotezi reddedilmiştir. Yöneticilerin algılarına ilişkin ortalamaların daha yüksek olması konumları gereği daha doğru görünse de, yaşanan kazalar çalışanların algılarının gerçek hayatla daha uyumlu olduğunu göstermektedir.

Güvenlik kültürü değişkenleri ile katılımcıların iş tecrübeleri arasındaki ilişki incelendiğinde, bütün boyutlarda tecrübesiz çalışanların ortalama puanlarının tecrübeli çalışanlardan daha yüksek olduğu, en tecrübelilerin en düşük puanlara sahip olduğu

Çizelge 13. Konum (yönetici-çalışan) güvenlik kültürü ilişkisi (Position (manager-employee) security culture relationship)

Ölçekler	Yönetici			Çalışan			Mann-Whitney U Testi	
	N	M	SS	N	M	SS	Sig	Karar
Yöneticilerin Tutumları	16	4,17	,91	106	3,41	1,03	,008	Red
Yöneticilerin Davranışları		4,12	1,03		3,50	1,06	,028	Red
Güvenlik Önceliği		4,04	,85		3,68	1,07	,241	Kabul
Güvenlik İletişimi		4,01	1,02		3,67	1,02	,305	Kabul
Güvenlik Eğitimi		4,18	,76		3,56	1,14	,032	Red
Güvenlik Farkındalığı		4,42	,88		3,89	0,97	,037	Red
Çalışanların Katılımı		4,09	,54		3,49	1,08	,031	Red
Kadercilik		3,53	,89		3,02	1,17	,114	Kabul
Raporlama Kültürü		3,62	1,37		3,62	1,06	,011	Red

Çizelge 14. İş tecrübesine göre anlamlı farklılıklar bulunan boyutlarda güvenlik kültürü algısı (Safety culture perception in dimensions with significant differences according to work experience)

Ölçekler	Şantiye	Kruskal Wallis Testi		
		N	M	SS
Yöneticilerin Tutumları	1) 0-2 Yıl	18	3,88	,86
	2) 3-9 Yıl	37	3,49	,96
	3) 10-19 Yıl	37	3,78	1,00
	4) 20 Yılden Fazla	24	3,00	1,23
	Toplam	116	3,54	1,06
Güvenlik Önceliği	1) 0-2 Yıl	18	4,01	1,12
	2) 3-9 Yıl	37	3,76	,87
	3) 10-19 Yıl	37	3,95	1,01
	4) 20 Yılden Fazla	24	3,27	1,16
	Toplam	116	3,76	1,04
Güvenlik Eğitimi	1) 0-2 Yıl	18	4,00	,98
	2) 3-9 Yıl	37	3,62	,92
	3) 10-19 Yıl	37	3,94	1,12
	4) 20 Yılden Fazla	24	3,19	1,27
	Toplam	116	3,69	1,10

görülmektedir. Bu durumu tecrübe ile gerçeğin daha iyi anlaşıldığı şeklinde yorumlamak mümkündür. Güvenlik kültürü boyutlarından yönetici tutumu, güvenlik önceliği ve güvenlik eğitimi için anlamlı farklılıklar elde edilmiştir. Bu boyutlara ilişkin analiz sonuçları Çizelge 14'de sunulmuştur.

Çizelge 15'de verilen Kruskal Wallis test sonuçları demografik değişkenlerden yaş ile güvenlik kültürü değişkenleri arasında herhangi bir anlamlı farklılık olmadığını göstermiştir.

Çizelge 15. Yaşa göre güvenlik kültürü algısı (Safety culture perception according to age)

	yönetici tutumu	yönetici davranisi	güvenlik önceliği	güvenlik iletişimi	güvenlik eğitimi	güvenlik farkındal.	çalışan katılımı	kadercilik	raporlama
Chi-Square	,260	,139	,131	3,895	2,323	,991	3,132	6,621	,687
df	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Asymp. Sig.	,967	,987	,988	,273	,508	,804	,372	,085	,876

Güvenlik kültürü - güvenlik performansı değişkenleri arasındaki ilişkiler: Bu bölümde güvenlik kültürü değişkenleri ile güvenlik performansı değişkenleri olarak belirlenen iş kazasına uğrama, güvenlik uyumu (güvenliğe uyma) ve güvenlik katılımı değişkenleri arasındaki ilişkiler ele alınmıştır. Güvenlik kültürü ile iş kazasına uğrama ilişkisinin analizinde yaşanan kaza sayısının göreceli olarak az olması nedeniyle çalışma hayatı boyunca kaza geçiren ve bu işyerinde ramak kala olay yaşayan çalışanlar birlikte analiz edilmişlerdir. Analiz sonucunda elde edilen Çizelge 16'da, kaza veya ramak kala olay yaşayanların ortalamalarının daha düşük olduğu, yani çevrelerindeki risklere karşı farkındalıklarının daha yüksek olduğu ve güvenlik konusunda diğer çalışanlar kadar rahat düşünmedikleri görülmektedir. Farklılıkların, güvenlik önceliği, güvenlik eğitimi, güvenlik iletişimi ve çalışan katılımı

boyutlarında istatistiksel olarak $p=0.1$ düzeyinde anlamlı olduğu görülmüştür.

Güvenlik kültürü değişkenlerinin kendi içlerindeki ve çalışanların güvenli davranışları (güvenlik uyumu ve güvenlik katılımı) ile korelasyonları Çizelge 17'de verilmiştir. Buna göre güvenlik kültürü boyutlarının kendi içlerinde kadercilik dışındaki diğer tüm değişkenlerle güçlü ve pozitif yönlü anlamlı bir ilişki içinde olduğu, kadercilik değişkeni ile ilişkisinin ise daha zayıf olduğu görülmektedir. En güçlü ilişki güvenlik

eğitimi ile güvenlik iletişimi ($r=,860$; $p<0,01$) arasında, en zayıf ilişki ise kadercilik ile güvenlik farkındalığı ($r=,224$; $p<0,05$) arasındadır. Tablo 14'de verilen güvenlik kültürü değişkenleri ile çalışanların güvenli davranışları değişkenlerindeki korelasyon analizi sonuçları incelendiğinde, hem güvenlik uyumu hem de güvenlik katılımı değişkenlerinin, kadercilik değişkeni ile zayıf diğer tüm değişkenlerle güçlü ve pozitif yönlü anlamlı bir ilişki içinde olduğu görülmektedir. Güvenlik uyumu değişkeninin en güçlü ilişki içinde olduğu değişken, güvenlik iletişimi ($r=,708$; $p<0,01$), güvenlik katılımı değişkeninin ise güvenlik farkındalığıdır ($r=,761$; $p<0,01$). Güvenlik uyumu ve katılımı arasında da doğal olarak çok güçlü bir ilişki söz konusudur ($r=,842$; $p<0,01$).

Çizelge 16. Güvenlik kültürü değişkenleri ile iş kazası ilişkisi (Safety culture work accident relationship)

Ölçekler	Kaza veya ramak kala						Mann-Whitney U Testi	
	Evet			Hayır			Sig	Karar
	N	M	SS	N	M	SS		
Yöneticilerin Tutumları	27	3,35	1,12	95	3,56	1,27	,484	Kabul
Yöneticilerin Davranışları		3,32	1,03		3,66	1,06	,162	Kabul
Güvenlik Önceliği		3,38	1,14		3,83	,98	,079	Red
Güvenlik İletişimi		3,38	1,02		3,81	,93	,079	Red
Güvenlik Eğitimi		3,28	1,20		3,75	1,21	,096	Red
Güvenlik Farkındalığı		3,79	,99		4,01	1,00	,206	Kabul
Çalışanların Katılımı		3,11	1,13		3,70	1,30	,020	Red
Kadercilik		3,08	,98		3,09	1,18	,894	Kabul
Raporlama Kültürü		3,57	1,12		3,74	1,08	,398	Kabul

Çizelge 17. Güvenlik kültürü değişkenleri ile güvenli davranış arasındaki korelasyon analizi sonuçları (Results of correlation analysis between safety culture variables and safe behavior)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1-Yöneticilerin Tutumları	1									
2-Yöneticilerin Davranışları	,719**	1								
3-Güvenlik Önceliği	,679**	,829**	1							
4-Güvenlik İletişimi	,707**	,763**	,849**	1						
5-Güvenlik Eğitimi	,717**	,759**	,809**	,860**	1					
6-Güvenlik Farkındalığı	,658**	,674**	,738**	,710**	,686**	1				
7-Çalışanların Katılımı	,519**	,572**	,601**	,632**	,641**	,661**	1			
8-Kadercilik	,252**	,293**	,311**	,319**	,343**	,224*	,403**	1		
9-Raporlama Kültürü	,644**	,619**	,691**	,691**	,718**	,711**	,666**	,399**	1	
10-Güvenlik Uyumuna	,532**	,609**	,621**	,708**	,681**	,696**	,668**	,282**	,681**	1
11-Güvenlik Katılımı	,618**	,642**	,707**	,744**	,712**	,761**	,670**	,294**	,724**	,842**

*p<0,05 **p<0,01

Güvenlik kültürü değişkenlerinin çalışanların güvenlik performansını nedensellik üzerinden incelemek amacıyla regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Çizelge 18’de güvenlik kültürü değişkenlerinin güvenlik uyumu üzerindeki etkisine yönelik regresyon analizi sonuçları verilmiştir. Buna göre, çoklu regresyon analizi sonuçları F testine göre kurulan modelin 0,05 düzeyinde anlamlı olduğunu göstermektedir. Güvenlik kültürüne ilişkin bağımsız değişkenler, bağımlı değişken olan güvenlik uyumu davranışındaki değişimi %62 oranında açıklamaktadır. (Düzeltilmiş $R^2 = ,618$). Diğer taraftan tablodan değişime güvenlik önceliği, güvenlik iletişimi,

güvenlik farkındalığı, çalışanların katılımı ve raporlama kültürü boyutlarının anlamlı katkıda bulunduğu, diğer boyutlarda anlamlı katkı sağlanmadığı görülmektedir.

Çizelge 19’da güvenlik kültürü değişkenlerinin güvenlik katılımı üzerindeki etkisine yönelik regresyon analizi sonuçları verilmiştir. F testine göre kurulan modelin 0,05 düzeyinde anlamlıdır. Güvenlik katılımı davranışındaki değişim, %68 oranında güvenlik kültürüne ilişkin bağımsız değişkenler tarafından açıklamaktadır. (Düzeltilmiş $R^2 = ,675$). Değişime güvenlik iletişimi, güvenlik farkındalığı ve raporlama kültürü anlamlı

Çizelge 18. Güvenlik kültürü değişkenlerinin güvenlik uyumuna etkisi çoklu regresyon analizi sonuçları (Results of multiple regression analysis of the effect of safety culture variables on safety harmonization)

Bağımsız Değişken: Güvenlik Kültürü	Bağımlı Değişken: Güvenlik Uyumuna			t	Sig.
	B	Std. Hata	Beta (β)		
Yöneticilerin Tutumları	-,145	,089	-,151	-1,643	,103
Yöneticilerin Davranışları	,139	,106	,144	1,308	,194
Güvenlik Önceliği	-,257	,127	-,268	-2,026	,045
Güvenlik İletişimi	,363	,129	,370	2,825	,006
Güvenlik Eğitimi	,102	,112	,113	,907	,366
Güvenlik Farkındalığı	,292	,106	,273	2,747	,007
Çalışanların Katılımı	,191	,080	,203	2,370	,019
Kadercilik	-,022	,054	-,026	-,412	,681
Raporlama Kültürü	,212	,093	,219	2,267	,025
$R^2 = 0,647$ Düzeltilmiş $R^2 = 0,618$ $F = 22,775^*$ *p<0,05					

katkıda bulunduğu, diğer boyutlarda anlamlı katkı sağlanmadığı görülmektedir

kültürü için eğitim seviyesine göre istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Farklı şehirlerde bulu-

Çizelge 19. Güvenlik kültürü değişkenlerinin güvenlik katılımına etkisi çoklu regresyon analizi sonuçları (Results of multiple regression analysis of the effect of safety culture variables on safety participation)

Bağımsız Değişken	Bağımlı Değişken Güvenlik Katılımı			t	Sig.
	B	Std. Hata	Beta (β)		
Güvenlik Kültürü					
Yöneticilerin Tutumları	-,004	,081	-,004	-,049	,961
Yöneticilerin Davranışları	-,005	,097	-,005	-,048	,962
Güvenlik Önceliği	,002	,116	,002	,013	,990
Güvenlik İletişimi	,256	,118	,263	2,175	,032
Güvenlik Eğitimi	,039	,103	,044	,383	,702
Güvenlik Farkındalığı	,334	,097	,315	3,445	,001
Çalışanların Katılımı	,131	,074	,141	1,782	,077
Kadercilik	-,009	,049	-,011	-,180	,857
Raporlama Kültürü	,194	,085	,202	2,267	,025
$R^2 = 0,699$ Düzeltilmiş $R^2 = 0,675$ $F = 28,936^*$ $*p < 0,05$					

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (RESULTS AND RECOMMENDATIONS)

Yasal ve kurumsal anlamda alınan bir çok önleme rağmen inşaat sektöründe iş kazalarına yaşanmasına engel olunamaması, konuya daha farklı yaklaşılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Bütün düzenlemelerin hayata ancak insan tarafından geçirilebildiği düşünüldüğünde, çözümün de ancak insanın kendisinde aranması gerektiği gerçeği ile karşılaşılmalıdır. Bu gerçekten hareketle geliştirilen güvenlik kültürü ve güvenlik iklimi kavramları, çağdaş dünyanın son 20-30 yıldır üzerinde titizlikle çalıştığı konuların temelini oluşturmaktadır. Söz konusu kavramları gözardı ederek yapılan düzenlemelerin, kazaları önlemede yetersiz kaldığı ve başarısızlığa mahkûm olduğu, bugün açık bir şekilde görülmektedir. Ülkemiz inşaat sektöründe güvenli çalışma ortamları yaratılmasına katkı sağlamak amacıyla gerçekleştirilen bu çalışmada, inşaat çalışanlarının güvenlik kültürü algı düzeyleri tespit edilerek, güvenlik kültürünün demografik değişkenler ve güvenlik performansı ile olan ilişkisi incelenmiştir.

Araştırmanın ilk bölümünde güvenlik kültürü demografik yapı ilişkisine dair sonuçlar elde edilmiştir. Çalışanların medeni durumlarına göre yapılan analizde kadercilik ve güvenlik iletişimi boyutlarında evli veya bekâr olma durumlarına göre istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık elde edilmiş, evlilerin daha kadercilik bir yaklaşım sergiledikleri görülmüştür. Katılımcıların eğitim seviyeleri ile güvenlik kültürü ilişkisi incelendiğinde genel olarak bütün boyutlarda daha eğitimsiz (okuryazar) grubun ortalaması yüksek çıkarken, üniversitelilere ilişkin ortalamalar daha düşük çıkmıştır. Bu durumun eğitim seviyesi ile birlikte risklere karşı farkındalığın artmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, bütün boyutlar içerisinde yalnızca kadercilik ve raporlama

nan 5 farklı şantiyede gerçekleştirilen çalışmada güvenlik iletişimi, güvenlik eğitimi, güvenlik farkındalığı, çalışan katılımı, kadercilik ve raporlama kültürü için şantiyeler arasında anlamlı farklılıklar tespit edilmiştir. Bu durumun şantiyelerdeki güvenlik iklimi farklılığından mı, yoksa çalışanların kendilerine has özelliklerinden mi kaynaklandığını tespit etmek için daha ayrıntılı çalışma yapılması gerekecektir. Güvenlik kültürü değişkenlerinin birçok boyutunda çalışanların işteki konumuna göre anlamlı farklılıklar oluştuğu görülmüştür. Yöneticilerin doğal olarak olumlu algı geliştirdiği, ancak meydana gelen kazalardan çalışanların yaklaşımının daha gerçekçi olduğunu söylemek mümkündür. Katılımcıların iş tecrübeleri açısından bakıldığında, bütün boyutlarda tecrübesiz çalışanların tecrübeli çalışanlara göre daha yüksek ortalamalara sahip olduğu ve yönetici tutumu, güvenlik önceliği ve güvenlik eğitimi boyutlarında farklılıkların anlamlı olduğu görülmüştür. Buradan tecrübesiz çalışanların kazalara karşı duyarlılığının daha az olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Araştırmada yaş ile güvenlik kültürü değişkenleri arasında ise herhangi bir anlamlı farklılığa rastlanmamıştır.

Araştırmanın ikinci bölümünde güvenlik kültürü güvenlik performansı ilişkisi araştırılmıştır. Güvenlik kültürü ile iş kazasına uğrama ilişkisine dair analizler kaza yaşamış çalışanların risklere karşı farkındalığının arttığı, çalışma ortamında sağlanan güvenlik koşullarının yeterliliği konusunda daha ihtiyatlı bir tutum sergiledikleri görülmektedir. Araştırma, güvenlik kültürü ve güvenlik performansı değişkenlerinin kendi içlerinde ve birbirleri arasında yüksek bir korelasyon bulunduğunu göstermiştir. Araştırmanın en kritik noktalarından birisi güvenlik kültürünün çalışanların güvenliğe uyma ve güvenliğe katılım davranışlarını etkileyip etkilemediğinin tespitidir. Yapılan regresyon analizi sonuçları, güvenlik performansındaki değişimlerin, güvenlik kültürü değişkenlerinden

güvenlik önceliği, güvenlik iletişimi, güvenlik farkındalığı, çalışanların katılımı ve raporlama kültürü tarafından anlamlı oranda açıklandığını göstermiştir.

Yapılan tüm çalışmalar, inşaat çalışanları için güvenli ve sağlıklı çalışma ortamlarının oluşturulmasında, pozitif güvenlik kültürünün önemini orataya koymaktadır. Bu araştırmaya ilişkin sonuçlar bir bütün olarak değerlendirildiğinde, güvenlik performansının tüm güvenlik kültürü boyutları ile az ya da çok ilişkili olduğu görülmektedir. Bu anlamda yönetimin bağlılığının geliştirilmesinden başlamak üzere, güvenliğin öncelenmesi, iletişimin sağlanması, eğitim faaliyetlerinin artırılması, farkındalığı ve yetkinliği artırıcı tedbirler alınması, çalışan katılımının sağlanması, kadercilik anlayışının azaltılması ve raporlama kültürü edindirilmesi kapsamında yapılacak tüm faaliyetler kazaların azaltılmasına katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmanın, güvenlik kültürü kavramının Türk inşaat sektörünün daha fazla gündemine girmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir. İnşaat sektöründe güvenlik kültürü güvenlik performansını ilişkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için, daha fazla sayıda çalışmanın yapılması gereklidir. Bu kapsamda, güvenli kültürü boyutlarından yalnızca bir veya birkaçının daha detaylı bir şekilde ele alındığı, inşaat firmalarının büyüklüğü ve kurumsallığı gibi unsurların dikkate alındığı, örneklem sayısının büyük tutulduğu, niceliksel ölçüm metodları ile birlikte niteliksel ölçümlerin yapıldığı çalışmalar, inşaat kazalarının önlenmesi yolunda paydaşlara yol gösterecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] İntes, “İnşaat Sektörü Raporu” *Türkiye İnşaat Sanayicileri İşveren Sendikası*, (2014).
- [2] ILO (International Labour Office), <http://laborsta.ilo.org>.
- [3] Eurostat, “European Statistics on Accidents at Work (ESAW)” <http://europa.eu.int/comm/eurostat>.
- [4] İş Teftiş Kurul Başkanlığı, “Yapı İşyerlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Teftiş Projesi Genel Değerlendirme Raporu”, Yayın No:16, (2007).
- [5] Müngen, U., “İnşaat Sektörümüzdeki Başlıca İş Kazası Tipleri” *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 5: 33-39, (2011).
- [6] Taşdemir, Y. “Kaza Riskinin En Fazla Olduğu Sektör: İnşaat”, *İşte Sağlık Dergisi*, 1: 23-27, (2010).
- [7] Kurt, M.İ. “Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği” http://www.csgb.gov.tr/csgbPortal/ShowDoc/WLP+Repository/per/dosyalar/duyurular/20022014_2
- [8] Ercan, A. “Türkiye’de Yapı Sektöründe İşçi Sağlığı ve Güvenliğinin Değerlendirilmesi” *Politeknik Dergisi*, 13(1): 49-51, (2010).
- [9] SGK (Sosyal Güvenlik Kurumu), SGK 2013 İstatistik Yıllıkları, <http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/tr/kurumsal/istatistikler>
- [10] Güranlı, G. E. ve Müngen, U., “İnşaat Şantiyelerine Özgü Bir İş Güvenliği Risk Analizi Yöntemi”, (2015).
- [11] İŞGÜM (İş Sağlığı ve Güvenliği Genel Müdürlüğü), <http://isag.calisma.gov.tr>, Erişim Tarihi: 10.08.2015.
- [12] Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı, “İş Sağlığı ve Güvenliğine İlişkin Tehlike Sınıfları Tebliği”, *Resmi Gazete*, Sayı: 27320, (2009).
- [13] Tomas, J.M., Melia, J.L., Oliver, A. “A Cross-Validation of a Structural Equation Model of Accidents: Organizational and Psychological Variables As Predictors of Work Safety” *Work & Stress*, 13(1): 49-58., (1999).
- [14] Turner, B.A., Pidgeon, “N.F. Man-made Disasters” *Oxford: Butterworth Heinemann*, (1997).
- [15] Reason, J., “Managing the Risks of Organizational Accidents”, *Ashgate Aldershot*, (1997).
- [16] Halis, M., Naktiyok, A. “Durumsallığı Açısından Türk Örgüt Kültüründeki Yönelimler” *Manas Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 5: 109-135, (2003).
- [17] Parker, D., Matthew L., Patrick H. A. “Framework for Understanding the Development of Organisational Safety Culture”, *Safety Science*, 44(6): 551-562, (2006).
- [18] Turner, B. A., Pidgeon, N. F., Blockley, D. I., Toft, B., “Safety Culture: Its Position in Future Risk Management”, *Second World Bank Workshop on Safety Control and Risk Management*, Karlstad, Sweden, (1989).
- [19] Choudhry RM, Fang D, Mohamed S. “The Nature of Safety Culture: a Survey of the State of the Art”, *Safety Science*, 1-20, (2006).
- [20] Uslu, V., “İşletmelerde İş Güvenliği Performansı ve İş Güvenliği Kültürü Algılamaları Arasındaki İlişki: Eskişehir İli Metal Sektöründe Bir Araştırma”, *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, (2014).
- [21] Muniz, Beatriz F., Peon, J.M.M., Ordas, C.J.V., “Safety Culture: Analysis of the Causal Relationships Between its Key Dimensions”, *Journal of Safety Research*, 38: 627-641, (2007).
- [22] The Center for Construction Research and Training, <http://www.cpwr.com/safety-culture>
- [23] Gillen, M., Schneider, S., Hecker, S., Goldenhar, L. “Construction Safety and Health Culture”, *Safety Culture & Climate in Construction: Bridging the Gap Between Research and Practice Workshop*, Washington, (2013).
- [24] Gillen M, Balz D, Gassel M, Kirsch L, Vaccaro D. “Perceived Safety Climate, Job Demands and Coworker Support Among Union and Nonunion Injured Construction Workers”, *Journal of Safety Resource*, 33: 33-51, (2002).
- [25] Melia J., Mearns K., Silvia A., Silvia M., Luisa L.M., “Safety Climate Responses and the Perceived Risk of Accidents in the Construction Industry”, *Safety Science*, 46: 949-958, (2008).
- [26] Lingard, H. “The Effect of First Aid Training on Australian Construction Workers’ Occupational Health and Safety Motivation and Risk Control Behavior”, *Journal of Safety Research*, 33: 209-230, (2002).
- [27] Mohamed, S. “Empirical Investigation of Construction Safety Management Activities and Performance in Australia”, *Safety Science*, 33: 125-132, (1999).
- [28] Mohamed, S. “Safety Climate in Construction Site Environments”, *Journal of Construction Engineering and Management*, 128: 375-384, (2002).

- [29] Siu, O., Phillips, D. R., Leung, T. W. "Safety Climate and Safety Performance Among Construction Workers in Hong Kong: The Role of Psychological Strains as Mediators", *Accident Analysis and Prevention*, 36: 359–366, (2004).
- [30] Shoji, T., Egawa, Y. "Structure of Safety Climates and its Effects on Workers' Attitudes and Work Safety at Japanese Construction Work Sites", *Journal of the University of Occupational and Environmental Health*, 28: 29–43, (2006).
- [31] Burt, C. D., Sepie, B., McFadden, G. "The Development of Considerate and Responsible Safety Attitudes in Work Teams", *Safety Science*, 46: 79–91, (2008).
- [32] Törner M, Pousette A. "Safety in Construction: A Comprehensive Description of the Characteristics of High Safety Standards in Construction Work, From the Combined Perspective of Supervisors and Experienced Workers", *Journal of Safety Research*, 40(6): 399-409, (2009).
- [33] Gittleman J, Gardner PC, Haile E., Sampson, JM, Cigularov, KP, Ermann, ED, Stafford P., Chen PY. "City Center and Cosmopolitan Construction Projects, Las Vegas, Nevada: Lessons Learned From the Use of Multiple Sources and Mixed Methods in a Safety Needs Assessment", *Journal of Safety Research*, 41(263–1): (2010).
- [34] Fung, I.W.H., Tam, C.M.,Tung, C.F.K, Man, A.S.K. "Safety Cultural Divergences Among Management, Supervisory and Worker Groups in Hong Kong Construction Industry", *International Journal of Project Management*, 23: 504–512, (2005).
- [35] Zhou, Quan; Fang, D.,Mohamed, S. "Safety Climate Improvement: Case Study in a Chinese Construction Company", *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(1): 86-95, (2011).
- [36] Goldenhar, L.M.,Williams, L.J.,Swanson, N.G. "Modelling Relationships Between Job Stressors and Injury and Near-Miss Outcomes For Construction Labourers", *Work and Stress*, 17(3): 218-240, (2003).
- [37] Dursun, S. "Güvenlik Kültürünün Güvenlik Performansı Üzerine Etkisine Yönelik Bir Uygulama", *Doktora Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Yönetim ve Çalışma Psikolojisi Bilim Dalı, (2011).
- [38] SPSS, I. IBM SPSS statistics version 21, Boston, *Mass: International Business Machines Corp*, (2012).
- [39] Cronbach, Lee J. "Coefficient Alpha and the Internal Structure of Tests", *Psychometrika*, 16(3): 297-334, (1951).
- [40] Helmstater G. "Principles of Psychological Measurement" New York, *Appleton-Century-Crofts*, (1964).
- [41] Bowling, A., Shah E."Handbook of Health Research Methods: Investigation, Measurement and Analysis", *McGraw-Hill Education*, (2005).

5 Eksenli Manipülâtörün Eklem Uzayında Yörünge Planlaması

Sabri UZUNER¹, Nihat AKKUŞ^{2*}, Metin TOZ³

¹Düzce Üniversitesi, Cumayeri Meslek Yüksekokulu, 81700, Düzce, TÜRKİYE

²Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 34722, İstanbul, TÜRKİYE

³Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, 81620, Düzce, TÜRKİYE

(Geliş/Received : 21.03.2016 ; Kabul/Accepted : 03.08.2016)

ÖZ

Bu çalışmada eğitim amaçlı kullanılmak üzere dönel eklemlere sahip 5 Serbestlik Dereceli (SD) bir seri robot manipülâtörü gerçekleştirilmiştir. Robot 150 gr taşıma kapasiteli ve eklem hareketleri rahat, sürtünmesiz ve titreşimsiz olarak hareket edebilmesine imkân sağlayacak özelliklerde, radyo kontrollü R/C Servo motorlar kullanılmıştır. Eklem uzayında yörünge planlaması yapabilmek için robotun ters kinematik problemi çözülmüş ve yörünge planlaması üçüncü dereceden bir polinom kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan 5 eksenli manipülâtörün kullanıcı tarafından rahat ve basit bir şekilde kullanılması amacıyla Visual BASIC programında görsel bir arayüz hazırlanmıştır. Son olarak geliştirilen mekanizmanın öğrenciler tarafından yapılan robotlarla ilgili uygulamalarda başarıyla kullanıldığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Manipülâtör, Yörünge Planlaması, Ters Kinematik, Üçüncü Dereceden Polinomlar.

Trajectory Planning of a 5-DOF Serial Robot Manipulator in Joint-Space

ABSTRACT

In this study, a five Degrees of Freedom (DOF) serial robot manipulator with revolute joints was designed and realized to be used for educational purposes. The robot has 150 gr payload and the motions of the joints were provided by using radio controlled R/C servo motors with smooth and vibration-free movement. In order to perform the trajectory planning in the joint space the inverse kinematics problem of the robot was solved and a third order polynomial was used for the trajectory planning. So as to present a simple and efficient way to the user for controlling the robot, a visual user interface was also designed by utilizing Visual Basic Programming Language. Finally, it was observed that the designed mechanism has been successfully used by the students for the projects involving robots.

Keywords: Manipulator, Trajectory Planning, Inverse Kinematics, Third Degree Polynomial.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yörünge planlama ve engellerden sakınma problemleri robot uygulamaları konusunda önemli araştırma alanlarından birisi olmuştur. [1] Uç efektörü bulunduğu konumdan arzu edilen konuma götürmek, bir robot manipülâtörün en temel sorunudur. Uç efektörün bu hareketi gerçekleştirirken yönelimi ve konumu ana çerçeveye göre değişir ve aynı zamanda bir takım ara noktalardan geçer. Aslında, uç efektörün başlangıç ve bitiş noktaları da birer ara nokta sayılır. Uç efektörü bu noktalardan geçerken, zamana bağlı olarak değişen belli bir hıza ve ivmeye sahiptir. Bu değişken ivmeli hareket titreşime neden olabilir. Robotun titreşimden uzak, çalışma uzayındaki herhangi bir cisme çarpmadan, eyleyicilerin sınırlarını zorlamadan kontrollü ve yumuşak bir şekilde hareket edebilmesi için yörünge planlaması yapılır [2]. Bu, her an için, istenilen uç efektörün hızını ve dolayısıyla istenilen eklem hızlarını hesaplayarak yapılabilir. Manipülâtörün serbestlik derecesi; uç efektörün istenen koşullarda arzu

edilen yörüngeyi takip etme becerisini, denklem sayısını ve zorluğunu etkilemektedir. Eklem uzayında yörünge planlaması yapılırken üç veya daha yüksek dereceli polinomlar kullanılır. [2-3]. Bu çalışmaların öğrenciler tarafından eğitim amaçlı incelenmesi ve uygulama yapılabilmesi için eğitim amaçlı robotlara ihtiyaç vardır. Bu bağlamda, Duran ve arkadaşları [4] üç serbestlik dereceli PUMA tipi robot kolunun uç elemanının PID yöntemi ile yörünge kontrolü gerçekleştirmiştir. Sarıtaş ve arkadaşları [5] beş eksenli bir Edubot robotun; pozisyonda, hızda ve ivmede süreklilik sağlamak için, beşinci dereceden polinomlar kullanarak yörünge planlaması gerçekleştirmiştir. Çırak [6] iki eklemlili bir scara robot manipülâtörünün hesaplanmış tork yöntemi ile yörünge kontrolünü ve simülasyon yazılımını gerçekleştirmiştir. Robotların eğitim amaçlı olarak kullanılmasına veya geliştirilen yazılımlarla robot eğitiminin simülasyonlar yolu ile verilmesine olan ilgi son zamanlarda oldukça artmıştır. Bu konuda literatürde yer alan çalışmalara bazı örnekler şu şekilde verilebilir. Kucuk ve Bingul [7] çalışmalarında eğitim amaçlı bir yazılım geliştirmişlerdir. Yazarların ROBO LAB ismini verdikleri ve MATLAB programı ile birlikte çalışan bu yazılımda 6 SD ne sahip 16 adet temel

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: nihat.akkus@marmara.edu.tr

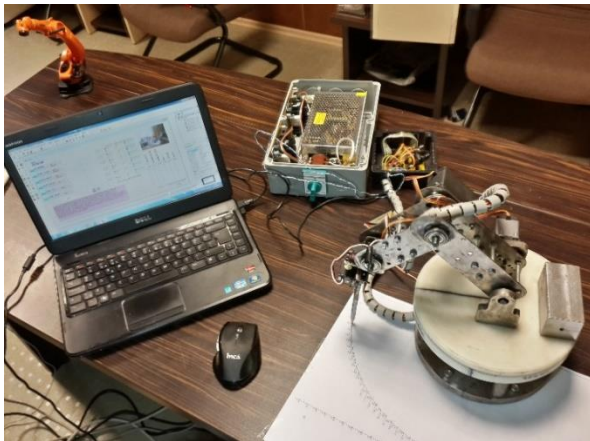
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 151-157

seri robot mekanizmasının simülasyonu, kinematik analizi ve yörünge planlanması gerçekleştirilebilmektedir. Toz ve Kucuk ise ROBOLAB'ın bir üst versiyonu geliştirmişlerdir. Bu yazılım sayesinde ROBOLAB'ın tüm yeteneklerine ek olarak 16 seri robot mekanizması için iki farklı yöntem ile dinamik analiz gerçekleştirilebilmektedir [8]. Toz ve Kucuk [9] bir diğer çalışmalarında ise 5 SD'ne sahip paralel robot mekanizmalarının tasarımı, kinematik analizi, simülasyonu, yörünge planlaması, tekil nokta analizi vb işlemlerin yapılabildiği ve GSPDAP adını verdikleri bir yazılım geliştirmişlerdir. Benzer bir diğer çalışmada, Inner ve Kucuk [10], genelleştirilmiş Stewart Platform mekanizmalarının tasarımı, analizi simülasyonu için STEWSIM ismini verdikleri bir yazılım geliştirmişlerdir. Cardeira ve Costa [11], mühendislik öğrencilerinin robotlara olan ilgisini arttırmak amacıyla bir mobil robot geliştirmişlerdir. Tanzawa ve arkadaşları [12], diş hekimliği eğitiminde kullanılmak üzere bir hasta robot geliştirmişlerdir. Bu robot kafatasını, dilini, çenesini ve gözlerini hareket ettirme kapasitesine sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.

Görüldüğü gibi robotlar eğitimin hemen her alanında kullanılabilir. Bu çalışmada da eğitim amacıyla kullanılmak üzere 5 SD'ne sahip bir seri robot manipülatörü gerçekleştirilmiştir. Ters kinematik denklemleri robot geometrisine uygun bir şekilde çıkartılmıştır. Robotun hassas ve titreşimsiz bir şekilde hareket etmesi için eklem uzayında yörünge planlaması yapılarak kontrol sağlanmış ve istenilen şartlarda hareketi gerçekleştirdiği görülmüştür. Eklem uzayında yörünge planlaması için üçüncü dereceden polinomlardan yararlanılmıştır.

2. YÖNTEM (METHOD)

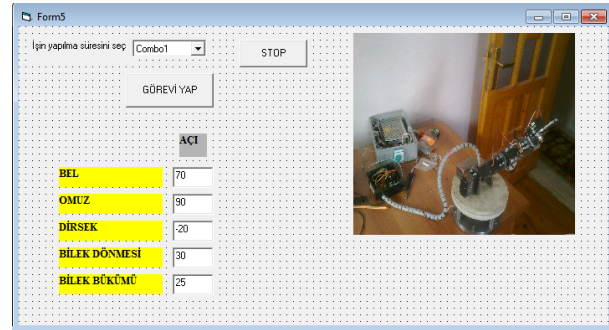
Yörünge planlaması için eğitim amacıyla kullanılmak üzere 5 SD'ne sahip bir seri robot manipülatör kullanılmıştır. Bu robot mekanizması birbirine 5 tane dönel eklemlerle bağlı katı cisimlerden oluşturulmuştur (Şekil 1). Eklemlerde kullanılan motorlar için RC servo motorlar tercih edilmiştir. Son olarak kontrol işlemleri için POLOLU Micro Maestro Servo kontrolör kullanılmış, güç katı ise kontrol kartına uygun olarak tasarlanmıştır. [13]



Şekil 1. 5 SD manipülatör sistem parçaları (The Platform of 5 DOF manipulator)

Yörünge planlamasında kullanılan ters kinematik denklemleri, robot geometrisine uygun bir şekilde analitik çözüm yöntemi ile basit arama yönteminin birlikte kullanıldığı bir algoritma tarafından gerçekleştirilmiştir. Seri robotun uç efektörünün başlangıçtan hedefe doğru sarsıntısız bir yörüngede hareket etmesini ve tüm eklemlerin aynı anda hareketi bitirmesi için üçüncü dereceden bir polinom kullanılarak eklem uzayında yörünge planlaması gerçekleştirilmiştir.

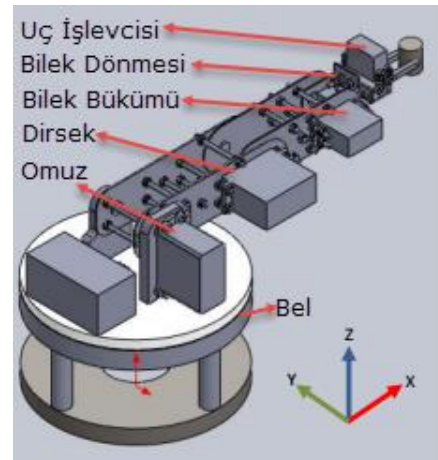
Eklem uzayındaki yörünge planlamasında; yol-zaman, hız-zaman, ivme-zaman grafikleri MATLAB programı aracılığı ile gerçekleştirilen ve birebir robotun aynı modeli olan seri robotun simülasyonundan elde edilmiştir. Ayrıca üçüncü derece polinomlardan elde edilen yol, hız ve ivme değerleri Visual Basic programı ile gerçekleştirilen arayüz sayesinde gerçek robota uygulanmış ve simülasyondaki gibi sarsıntısız bir hareket gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Yörünge planlaması arayüz programı (User interface of trajectory analysis)

2.1. Mekanik Tasarım (Mechanical Design)

Temel olarak eğitim amacıyla kullanılması planlanan seri robot mekanizmasının katı gövde yapısı tasarlanırken robotun uç işlevcisinin maksimum 150gr ağırlık taşımasının yeterli olacağı değerlendirilmiş ve katı gövde bu seçime göre tasarlanmıştır. Mekanik kısmın tasarımı yapılırken SolidWORKS programından yararlanılmıştır. Mekanizmanın bu program kullanılarak modellenen katı gövde yapısı Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. 5SD'li manipülatörün SolidWORKS görüntüsü (SolidWORKS drawing of 5 DOF manipulator)

Mekanizmanın mekanik tasarımı yapılırken uç efektörün kaldırabileceği maksimum yük miktarı, motor ve bağların ağırlıkları hesaplanarak optimum mekanik tasarım gerçekleştirilmeye çalışılmıştır ve mekanik kısımların malzeme seçiminde bu sınırlamalar dikkate alınmıştır. Bu kısımlar sırasıyla, alt tabla, ağır malzeme olan 1040 çelik, hareketli tabla motora yük bindiğinden ve sürtünmenin az olması istendiğinden poliamit, robot kol kısımları ise hafif olması için 1040 çelik yerine çelik sac malzemeden üretilmiştir. Ayrıca robotun ağırlık merkezinin orijinden kaymaması için dengeleyici yük kullanılmıştır. Mekanizmanın her bir eklemindeki açısal sınırlar Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. 5SD Manipülator eksen dönüş açıları (Rotation angles of 5 DOF manipulator)

Eksen	Açısal İsmi	Dönme Açısı
Uç Efektör	-	0 ~ 330mm
Bilek Dönmesi	(θ_5)	86,75° ~ -83,34°
Bilek Bükümü	(θ_4)	47,32° ~ -47,64°
Dirsek	(θ_3)	95,07° ~ -84,36°
Omuz	(θ_2)	146,831° ~ -3,19°
Bel	(θ_1)	107,26° ~ -102,8°

Sistemimizde robotun hareketini sağlamak için RC servo motorlar tercih edilmiştir. Motorların tork değerleri belirlenirken her bir motorun bulunduğu yere göre o motora etki edebilecek en büyük tork değerlerinin olduğu robot kol pozisyonları dikkate alınmıştır. Bunun nedeni bu pozisyonlarda ağırlık merkezlerinin motorlara dik olarak oluşmasıdır. Sistemde kullanılan motor özellikleri Çizelge 2’de verildiği gibi belirlenmiştir.[13]

Çizelge 2. Sistemde kullanılan RC servoların tork değerleri (Torque values of RC servos used in the system)

Eksen	Tork(Nm)
Uç Efektör Motoru	0.42168 Nm
Bilek Dönmesi Motoru	0.4903325 Nm
Bilek Bükümü Motoru	1.2552512 Nm
Dirsek Motoru	3.9 Nm
Omuz Motoru	2.941995 Nm
Bel Motoru	2.941995 Nm

2.2. Ters Kinematik (Inverse Kinematics)

Ters kinematik çözümü, ileri kinematik çözümü gibi tasarlanan her robot için kolayca çözülebilen bir problem değildir. Bu nedenle ters kinematik probleminin çözümünde analitik yöntemler kullanılabildiği gibi analitik çözümün mümkün olmadığı tasarımlarda farklı iteratif

yöntemler de uygulanabilmektedir. Bu çalışmada kullanılan seri robotun geometrisinden dolayı analitik ve iteratif yöntemler birlikte kullanılarak ters kinematik çözümüne gidilmiştir.

Bu makalede kullanılan seri robotun ileri kinematik denklemleri Uzuner tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezinden alınmıştır [13]. Ters kinematik çözümü için ise ilk aşamada analitik olarak tüm çözümler denenmiş ve “ θ_1 ” için analitik çözüm elde edilmiş ancak diğer açıların çözümlerine manipülatorün geometrisi yüzünden ulaşılamamıştır. Bu nedenle iteratif yöntemlerden olan basit arama yöntemi kullanılarak “ θ_2 ” değeri bulunmuştur (Şekil 4). Uç işlevcisinin konumunu etkileyen diğer iki açı “ θ_3 ”, “ θ_4 ” tekrar analitik yöntemle bulunmuştur. Böylelikle her iki metottan yararlanarak sadece analitik yöntemle çözülemeyen ters kinematik çözümü gerçekleştirilmiştir. Ters kinematik analiz arayüz programı Visual Basic ortamında gerçekleştirilmiştir.

θ_1 açısı analitik olarak bulmak için, ${}^0T_9 = {}_{end_effector}^{base}T$ eşitliğini aşağıdaki Eş. 1’deki gibi yazabiliriz.

$${}^0T_9 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Burada; r_{ij} $i, j = 0, 1, 2$ transformasyon matrisinin yönelim değerlerini temsil etmektedir ve x, y, z değerleri ise uç işlevcisinin konum bilgisini vermektedir. Ters kinematik denklemleri Eş. 2’deki gibi ileri kinematik denklemin her iki tarafını transformasyon matrisinin tersi alınıp çarpılarak bulunur. Bu işlem tüm açılar buluna kadar devam eder.

$$[{}^0T_9]^{-1} {}^0T_9 = [{}^0T_1]^{-1} {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 {}^6T_7 {}^7T_8 {}^8T_9 \quad (2)$$

Burada, $[{}^0T_1]^{-1}$ aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$[{}^0T_1]^{-1} = \begin{bmatrix} c(\theta_1) & s(\theta_1) & 0 & 0 \\ -s(\theta_1) & c(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -98 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Denklemden “s” ve “c” sembolleri sırası ile sinüs ve kosinüsün kısaltmasıdır. Eş. 2 içerisinde Eş. 3’ü yerleştirip denklemi düzenlikten sonra oluşan denklemden aşağıdaki gibi θ_1 açısını veren eşitliliği bulabiliriz.

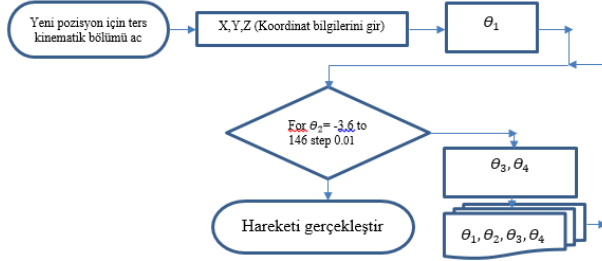
$$yc(\theta_1) - xs(\theta_1) = \frac{181}{50} \quad (4)$$

θ_1 açısı değeri trigonometrik denklemlerden yararlanılarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\theta_1 = \arctan2(-x, y) \quad (5)$$

$$\mp \sqrt{x^2 + y^2 - (181/50)^2} \cdot (181/50)$$

θ_2 açılı değeri analitik yöntemle bulunamadığı için basit arama yönteminden yararlanılmıştır (Şekil 4). θ_2 açılı değerinin alabileceği minimum değer -3.19° , maksimum değer ise 146.831° ve ilgili ekleme bağlanan servo motorun en küçük dönme açısı 0.01° dir.



Şekil 4. Basit arama algoritması (Simple search algorithm)

θ_2 'nin her bir değeri için θ_4 and θ_3 aşağıdaki eşitliklerden yararlanılarak bulunur.

$$\theta_4 = \arctan2 \left(\left(\sqrt{1 - \frac{((xc(\theta_1) + ys(\theta_1) - 125c(\theta_2))^2 + (z - 163 - 125s(\theta_2))^2 - 21017)}{2.101.104}}}{\frac{((xc(\theta_1) + ys(\theta_1) - 125c(\theta_2))^2 + (z - 163 - 125s(\theta_2))^2 - 21017)}{2.101.104}} \right) \right) \quad (6)$$

θ_1 değerini aşağıdaki Eş. 7'deki gibi tanımlarsak, θ_3 açılı değeri Eş. 8'deki gibi olur.

$$\theta_1 = \arctan2 \left(\frac{((z - 163)c \theta_4 + (xc(\theta_1) + ys(\theta_1))) ((z - 163) - 125s(\theta_2)) - 101s(\theta_4) ((xc(\theta_1) + ys(\theta_1)) - 125c(\theta_2))}{((z - 163)c \theta_4 + (xc(\theta_1) + ys(\theta_1))) ((xc(\theta_1) + ys(\theta_1)) - 125c(\theta_2)) + 101s(\theta_4) ((z - 163) - 125s(\theta_2))} \right) \quad (7)$$

$$\theta_3 = \arctan2 \left(\frac{(101c(\theta_4) + 104)101s(\theta_1 + \theta_4) + 104s(\theta_1) - 101s(\theta_4)101c(\theta_1 + \theta_4) + 104c(\theta_1)}{(101c(\theta_4) + 104)101c(\theta_1 + \theta_4) + 104c(\theta_1) + 101s(\theta_4)101s(\theta_1 + \theta_4) + 104s(\theta_1) - \theta_2} \right) \quad (8)$$

2.3. Yörünge Planlaması (Trajectory Analysis)

Bir Robot kolunun bir noktadan başka bir noktaya gerçekleştirdiği hareketini sarsıntısız, tüm eklemlerinin aynı anda görevini tamamladığı ve etrafındaki cisimlere çarpmadığı şekilde bitirmesi istenir. Bu amaçla o robot kolu için yörünge planlaması yapılır. Eğer yörünge planlaması yapılmazsa robot kola hedef pozisyon verdiğimizde robotun nasıl bir hareket sonucunda o konuma geleceğini bilemeyiz. Dolayısıyla, robot kolu bu hareketini gerçekleştirirken zemine, etrafındaki bir cisme veya kendisine çarpabilir. Bu da robot kola zarar verir. Bu nedenle kartezyen uzayda veya eklem uzayında yörünge planlaması yapılır. Bu çalışmada geliştirilen sistemde eklem uzayında yörünge planlaması üçüncü dereceden polinomlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Eş. 9).

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (9)$$

Eklem uzayında yörünge planlaması yapabilmek için verilen koordinat bilgileri kullanılarak ters kinematik denklemlerinden eksen açılı bilgilerinin bulunması gerekir. Belirlenen ters kinematik değerler kullanılarak yörünge planlaması gerçekleştirilebilir. Buna göre;

Robot kolun başlangıç ve bitiş pozisyonundaki hız değerleri sıfır (Durgun halden belli mesafe sonra durağan hale geçtiği için) olmak üzere; üçüncü dereceden bir polinomla yörünge planlaması yapabilmek için ilk olarak aşağıdaki dört değer belirlenir.

$$Q(0) = Q_0 \quad (10)$$

$$Q(tf) = Q_f \quad (11)$$

$$\dot{Q}(0) = 0 \quad (12)$$

$$\dot{Q}(tf) = 0 \quad (13)$$

Burada Q_0 başlangıç konumu, Q_f hedef konumu, $\dot{Q}(0)$ başlangıç hızı $\dot{Q}(tf)$ bitiş hızıdır. Daha sonra bu değerler Eş. 14,15,16'daki gibi yol, hız, ivme denklemlerinde yerlerine yazılarak yol-zaman, hız-zaman, ivme-zaman değerleri elde edilir.

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 \quad (14)$$

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 \quad (15)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3t \quad (16)$$

Burada a_0, a_1, a_2, a_3 denklemin katsayı değerleridir ve robot hareketinin başlangıç ve bitiş hızlarını sıfır aldığımız için denklemdaki katsayıların değerleri aşağıdaki gibidir.

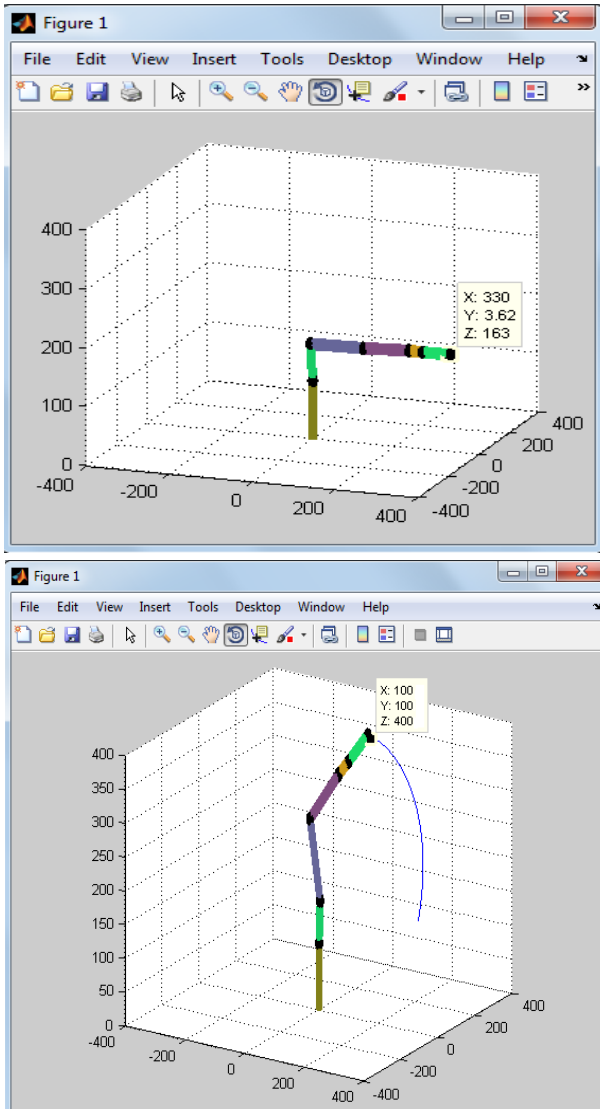
$$a_0 = \theta_0 \quad (17)$$

$$a_1 = 0 \quad (18)$$

$$a_2 = \frac{3}{t_f^2} (\theta_f - \theta_0) \quad (19)$$

$$a_3 = -\frac{2}{t_f^3} (\theta_f - \theta_0) \quad (20)$$

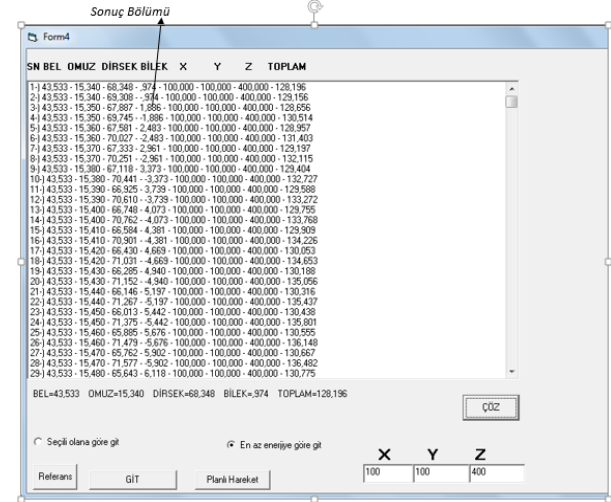
Örnek bir uygulama olarak tasarlanan robot kol uç efektörünün başlangıç pozisyonu $X=330\text{mm}$, $Y=3.62\text{mm}$, $Z=163\text{mm}$ ve hedef pozisyonu için ise $X=100\text{mm}$, $Y=100\text{mm}$ ve $Z=400\text{mm}$ olarak seçilmiştir. Seçilen konumlar için gerçekleştirilen simülasyon Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. a) Başlangıç pozisyonu (Referans position) b) Hedef pozisyonu (Target position)

Örnek uygulamanın gerçek sistem üzerinde gerçekleştirilebilmesi için ilk olarak geliştirilen kullanıcı arayüzü

programı sayesinde ters kinematik analiz yapılarak gerekli eksen açı değerleri bulunmuştur. Bu sonuçlardan bir tanesi seçilerek yörünge planlaması yapılmıştır.



Şekil 6. Ters kinematik analiz sonuçları (Result of inverse kinematics)

Ters kinematik analiz sonuçlarından seçilen bir çözümün açı değerleri aşağıdaki gibidir.

Elde edilen ters kinematik çözümlerine göre gerçekleştirilen yörünge planlaması sonucunda hesaplanan değişkenler her bir eklem için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Tüm eklemler için aynı işlemler yapıldığı için aşağıda sadece θ_1 için yapılan hesaplamalar sunulmuştur.

	θ_1 (Bel açısı) = 43.533°
	θ_2 (Omuz açısı) = 103.020°
X=100mm, Y=100mm, Z=400mm	θ_3 (Dirsek açısı) = -68.348°
	θ_4 (Bilek dönme açısı) = -1.605°

2.3.1. θ_1 Eklemi için yörünge planlaması

$$Q(0) = 0 \quad (21)$$

$$Q(tf) = 43.533 \quad (22)$$

$$\dot{Q}(0) = 0 \quad (23)$$

$$\dot{Q}(tf) = 0 \quad (24)$$

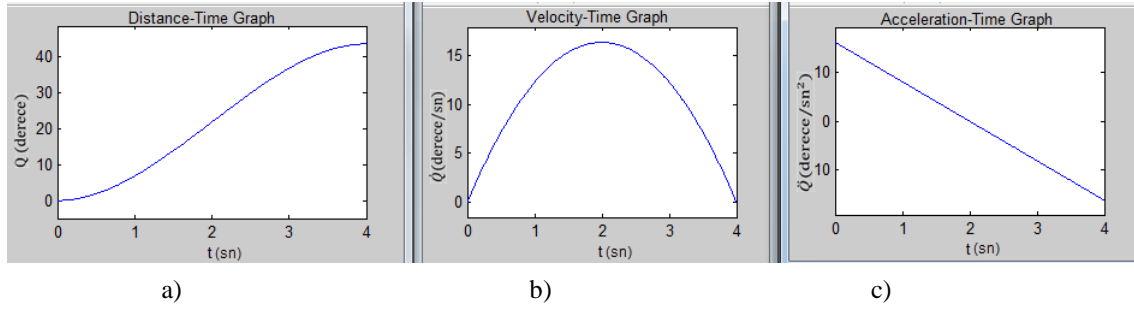
Robot kolun başlangıç pozisyonundan hedef pozisyonuna pürüzsüz bir şekilde 4sn'de götürülmesi amaçlanırsa yukarıdaki değerlere göre yol, hız ve ivme denklemleri aşağıdaki gibi olur.

$$Q(t) = 8.1624t^2 - 1.3604t^3 \quad (25)$$

$$\dot{Q}(t) = 16.3249t - 4.0812t^2 \quad (26)$$

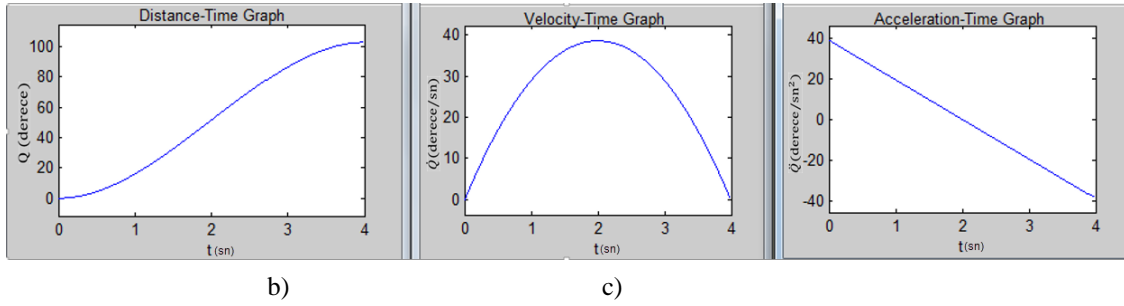
$$\ddot{Q}(t) = 16.3249 - 8.1624t \quad (27)$$

Bu denklemlere göre θ_1 için yol-zaman, hız-zaman ve ivme-zaman grafikleri de Şekil 7'de verildiği gibi elde edilmiştir.

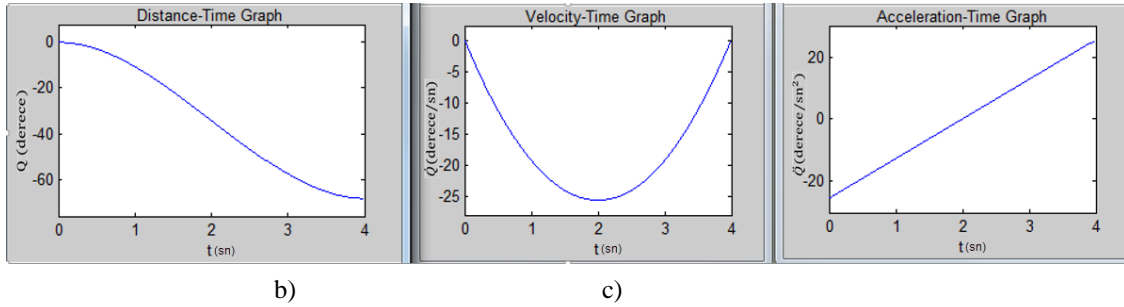


Şekil 7. θ_1 için; a)Yol-Zaman grafiği b) Hız-Zaman grafiği c)İvme-Zaman grafiği

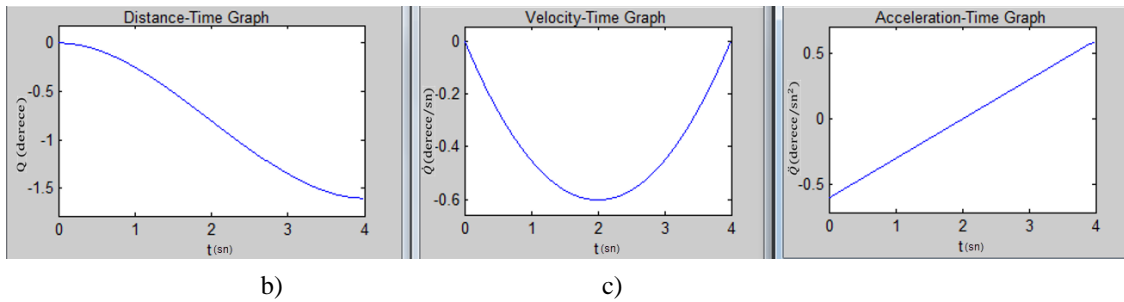
θ_1 için yapılan bu işlemler benzer şekilde diğer eklemler için tekrarlanmış ve aşağıdaki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 8. θ_2 için; a)Yol-Zaman grafiği b) Hız-Zaman grafiği c)İvme-Zaman grafiği



Şekil 9. θ_3 için; a)Yol-Zaman grafiği b) Hız-Zaman grafiği c)İvme-Zaman grafiği



Şekil 10. θ_4 için; a)Yol-Zaman grafiği b) Hız-Zaman grafiği c)İvme-Zaman grafiği

Analiz sonuçlarına göre tüm eklemlerin Yol-Zaman grafiğinde görüldüğü gibi eğrilerin başlangıç pozisyonuna ve bitiş pozisyonuna hatasız bir şekilde ulaştığı görülmüştür. Hız-Zaman grafiğinde ise eklemlerinin $t=0$ anında sıfır hızla başladığı ve gittikçe artan bir hızla hedeflenen sürenin yarısında maksimum hıza ulaştığı ve diğer kalan yarısında ise hızın aynı oranda azalarak ya-

vaş bir şekilde sıfıra değerine ulaştığı görülmektedir. İvmelenme ise hıza ters orantılı olarak değişmektedir. Bu sayede eklemlerdeki motorların, eklemler için farklı da olsa aynı anda görevlerini tamamlamakta ve motorlara uygun hız ve ivme değerleri verilerek sarsıntısız bir şekilde hareket sağlanmaktadır.

3. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Robot kolların tasarım farklılığından dolayı ters kinematik çözümleri sabit değildir. Bu çalışmada gerçekleştirilen robot kolu için bazı geometrik sıkıntılar ters kinematik çözümleri zorlaştırmış ve bu durum da analitik olarak ters kinematik çözümleri imkânsızlaştırmıştır. Bu nedenle çözüme ulaşmak için analitik çözümlerin yanında bilgisayar programından yararlanılmıştır. Geliştirilen basit arama ve analitik yöntemin birleştirildiği algoritma sayesinde analitik olarak çözümü olmayan 5 SD sahip robot kolun ters kinematik çözümüne ulaşılmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen robot kolun eklem uzayında yörünge planlaması yapılarak normal harekete göre daha hassas, titreşimsiz hareket etmesi sağlanmıştır. Yapılan analiz sonucunda istenilen şartlarda hareketlerin gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

BİLGİ (INFORMATION)

Bu makale Ulusal Mühendislik Araştırmaları Sempozyumunda Özet Bildiri olarak (UMAS 2015) sunulmuştur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kızıllan A., Toz M., Aliustaoğlu C. ve Bingül Z., "Gezgin robot tasarımı ve hareket planlaması", *TOK'07 Bildiriler Kitabı*, İstanbul, 371-376, (2007).
2. Bingü, Z., Küçük S., "Robot tekniği 1", *Birsen Yayınevi*, ISBN:975-511-424-6, İstanbul, 275-282, (2005).
3. Kumar V., "Motion planning and control of robots", In handbook of industrial robotics, *John Wiley and Sons*, New York, (1999).
4. M.A. Duran, A. Ankaralı, "Üç serbestlik derceli PUMA tipi bir manipülatörün PID kontrolü", *Teknik Bilimler MYO Teknik-Online Dergi*, 9: 79-98, (2010).
5. Saritas M., Tonbul T. S., "Bes eksenli bir robot kolunda ters kinematik hesaplamalar ve yörünge planlaması", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002).
6. Çırak B., "İki eklemlili bir SCARA robot manipülatörünün hesaplanmış tork yöntemi ile yörünge kontrolü.", *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 7(1): 77-91, (2014).
7. Kuçuk S., Bingul Z., "An off-line robot simulation toolbox", *Comput Appl Eng Edu.*, 18(1): 41 – 52, (2010).
8. Toz M., Kuçuk S., "Dynamics simulation toolbox for industrial robot manipulators", *Comput Appl Eng Edu.*, 18: 319-330, (2010).
9. Toz M., Kuçuk S., "Parallel manipulator software tool for design, analysis, and simulation of 195 Gsp mechanisms", *Comput Appl Eng Edu.*, 23(6): 805–966, (2015).
10. Inner B., Kuçuk S., (April 18, 2013), "A novel kinematic design, analysis and simulation tool for general stewart platforms", *The Society for Modeling and Simulation International*, 89(7): 876–897, (2013).
11. Cardeira C., Da Costa J. S., "A low cost mobile robot for engineering education", *32st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 2162-2167, USA, (2005).
12. Tanzawa T., Futaki K., Tani C., Hasegawa T., Yamamoto M., Miyazak, T. and Maki K., "Introduction of a robot patient into dental education", *European Journal of Dental Education*, 16: e195–e199, (2012).
13. Uzuner S., "Eksen kaçıklığı olan endüstriyel robotların ters kinematik çözümüne yeni bir yaklaşım", *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2012).

Dynamic Behavior Analysis of Rotor Supported by Damped Rolling Element Bearing Housing

Hamit SARUHAN¹, Menderes KAM^{2*}, Fuat KARA³

¹Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Düzce University, Düzce, Turkey

²Cumayeri Vocational School, Mechanical Division, Düzce University, Düzce, Turkey

³Technology Faculty, Department of Manufacturing Engineering, Düzce University, Düzce, Turkey

(Received : 24.03.2016 ; Accepted : 22.04.2016)

ABSTRACT

A typical rotating machinery system consists various components, such as rotor, support bearing, and disks. These components pass out energy into the system when coincident to critical speeds. Ignoring such event might lead to disastrous breakdown of the system. Due to necessity and vital contribution to most rotating machineries, the requirements on rolling element bearings have become stricter every day. In this experimental study, the dynamic behavior and displacement of rotor supported by damped rolling element bearing housing for different running speeds and load levels are analyzed and compared.

Keywords: Rotor, Rolling Element Bearing, Damped Bearing Housing, Critical Speed.

Sönümlü Yuvarlanmalı Yataklarla Desteklenen Milin Dinamik Davranış Analizi

ÖZ

Yaygın olarak kullanılan dönen sistemler miller, diskler ve rulmanlar gibi çeşitli makine elemanlarından oluşur. Bu parçaların büyük bir çoğunluğu yuvarlanmalı yataklar üzerinde çalışırlar. Mil-yatak sisteminde yükleme konumunun belirlenmesi sistemin dinamik davranışları açısından büyük önem taşır. Sistemde uygun olmayan yüklemelerin yapılması milin mekanik enerjisini artırır. Bu tür dinamik davranışların oluşumunu dikkate almamak sistemde arızaya neden olabilir. Bu nedenle yuvarlanmalı yataklar makinelerin dinamik davranışları için hayati bir fonksiyona sahiptir. Bu deneysel çalışmada, farklı çalışma hızları ve yük seviyeleri için sönümlü yuvarlanmalı yataklarla desteklenen mil, dinamik davranışları ve yer değiştirme yönünden incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Mil, Yuvarlanmalı Yatak, Sönümlü Yatak, Kritik Hız.

1. INTRODUCTION

Rolling element bearing is a fundamental component of rotating machinery and diagnosis of its dynamic behavior is very important. Large amount of use of rolling element bearings indicates their vital contribution to the performance of rotating machinery. Rotating machinery plays an important role in industry due to wide range of their applications. It is very important to control their dynamic behavior for a safe operation. There are many studies for rolling element bearing in literature. However, very few studies on the damped rolling element bearing housing. Dynamic behavior control has been an area of theoretical and experimental research [1]. Extended literature reviews on the state of the art can be found in reference [2] and reader is also referred to the references [3-10] for further reading. Rotating machinery often has problems of instability at high running speed, which can result in sudden failures of the whole system or parts of

it. This problem can be solved by adding damping in the bearing housing [5].

This study presents an isolator as damping between bearing and its surrounding and an experimental analysis of bearing housing able to work as an effective vibration damper has been employed. The results showed that the damped bearing housing can be used for reduction in rotor resonance amplitude where mass and stiffness cannot be used.

2. EXPERIMENTAL SETUP

The experimental setup used in this study is schematically shown in Figure 1. A shaft having length of 850 mm and diameter of 12.7 mm located in the set. The shaft is supported on two ball bearings and driven by 0.5 HP alternative current induction motor attached to flexible coupling and a variable speed control unit. Six disks having diameter of 126.2 mm and weight of 1507, 1508, 1506, 1500.5, 1506.5, and 1506.5 grams (from the left to the right respectively) are used in order to load the shafts for enhancing the spectrum amplitude of the

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: mendereskam@düzce.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 159-164

system. The disks are mounted on the shaft at different locations and unbalance is introduced to each disk with unbalance screw separately as sets to excite the shaft for critical speeds. The vibration spectrum of the inboard and outboard bearing housings in the vertical and horizontal directions are measured with accelerometers having frequency range up to 10 kHz. Two accelerometers are mounted on each of bearing housings with 90° apart. The system incorporates Data Acquisition card supplies channels for vibratory response and rotational speed acquisition. Channels were set as Ch1 and Ch2 for inboard (close to motor) bearing housing while Ch3 and Ch4 for outboard bearing housing to measure vibration response in the vertical and horizontal directions respectively. Two Eddy Current Proximity probes (whose resolution is 1 μm - micrometer) for measuring the shaft relative displacements are fixed on rigid supports at 2 mm linear distance between probe tip and shaft surface. The vertically and horizontally mounted probes make it possible to reliably observe the vibration behavior. The data were gathered using the Spectra Quest™ software and hardware system.

The experimental test procedures were as follows: two test cases were utilized to understand dynamic behavioral changes of the shaft mounted on typical (plain) bearing housing and damped bearing housing. Seven experimental setups were employed under five shaft running speeds (10, 20, 30, 40, and 50 Hz) for each of the test cases. The set A was utilized for normal state without

unbalance screw in order to establish the base-line data. Set B, Set C, Set E, Set F, and Set G were used for different location with unbalance screw attached to the disk while the Set D was used with two unbalance screw attached to disk. The sets (Set A, Set B, Set C, Set D, Set E, Set F, and Set G) configurations are given in Figure 2.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The vibration responses of plain and damped bearings were measured at different unbalance screw position and speeds. Figure 3 gives maximum peaks of vibration spectrum from inboard bearing housing in the vertical direction (Ch1) and the horizontal direction (Ch2), and also from outboard bearing housing in the vertical direction (Ch3) and the horizontal direction (Ch4) for all test cases with respect to running speeds of 10, 20, 30, 40, and 50 Hz. It can be observed from Figure 3 that values of vibration amplitude vary with sets configurations. This indicates that unbalanced weight distribution affect the amplitude. It should be noted that the spectrum from from bearing housing in vertical direction represents resonance compare to the horizontal direction for the most of the test cases. Thus, the unbalance force gravity acts perpendicular downward on the shaft. This is very clear for the shaft running speed of 50 Hz. The maximum amplitude value of 0.0500 gRMS, an average of overall vibration, was recorded from Ch4 for Set D of damped bearing housing at shaft speed of 50 Hz while 0.0450 gRMS from Ch4 for Set D of plain

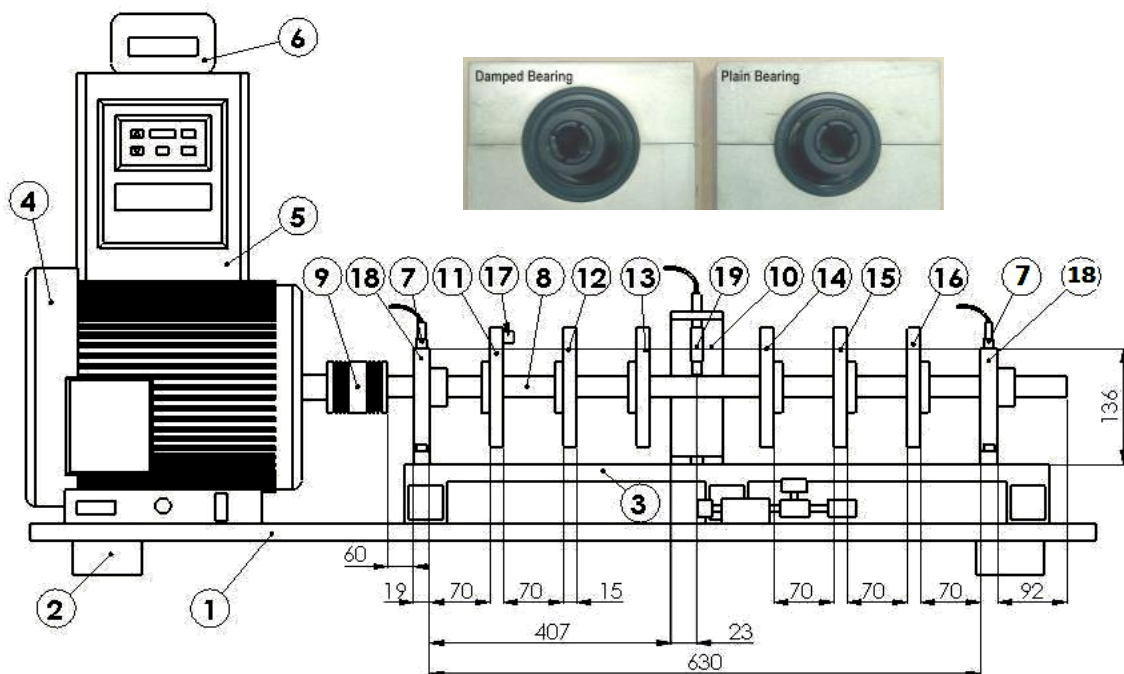


Fig. 1. Experimental setup

- (1) Basis; (2) Rubber isolators; (3) Extended rotor headpiece; (4) Motor; (5) Variable speed controller; (6) Tachometer; (7) Accelerometer; (8) Shaft; (9) Flexible coupling; (10) Rigid support for proxy probe; (11) Disk (1507 gr); (12) Disk (1508 gr); (13) Disk (1506 gr); (14) Disk (1500.5 gr); (15) Disk (1506.5 gr); (16) Disk (1506.5 gr); (17) screw (4.5 gr); (18) Bearing housing; (19) Proxy probe.

bearing housing. It can be said that the faster the shaft running speed the larger the magnitude of vibration response. It should be noted that the most of amplitude values for the plain bearing housing was higher than the damped bearing housing at shaft running speed of 20 Hz comparing to those of 10, 30, and 40 Hz at start-up. Also it should be note that it is not the case for shaft speed of 50 Hz. Figure 4 illustrates the vibration data captured from inboard and outboard bearing housing in the vertical and horizontal directions showing multiple channels in one graph for shaft running speed of 20 Hz. The vibration data collected from all channels are arranged as from the

bottom plot through the upper plot as ch1, ch2, ch3, and ch4 respectively. Although each spectrum is composed of 5000 individual peak, the frequency range of 0-1 kHz is presented. The amplitude peaks show the energy distributions at different frequencies for plain and damped bearing housing. The magnitude of amplitude spectrum for plain bearing is found to be quite unstable in comparison to damped bearing. It can obviously be seen that the vibration level for plain bearing housing is higher than that for damped bearing housing. It can be concluded that adding damping between bearing and its surroundings enables to reduce amplitude of the vibration

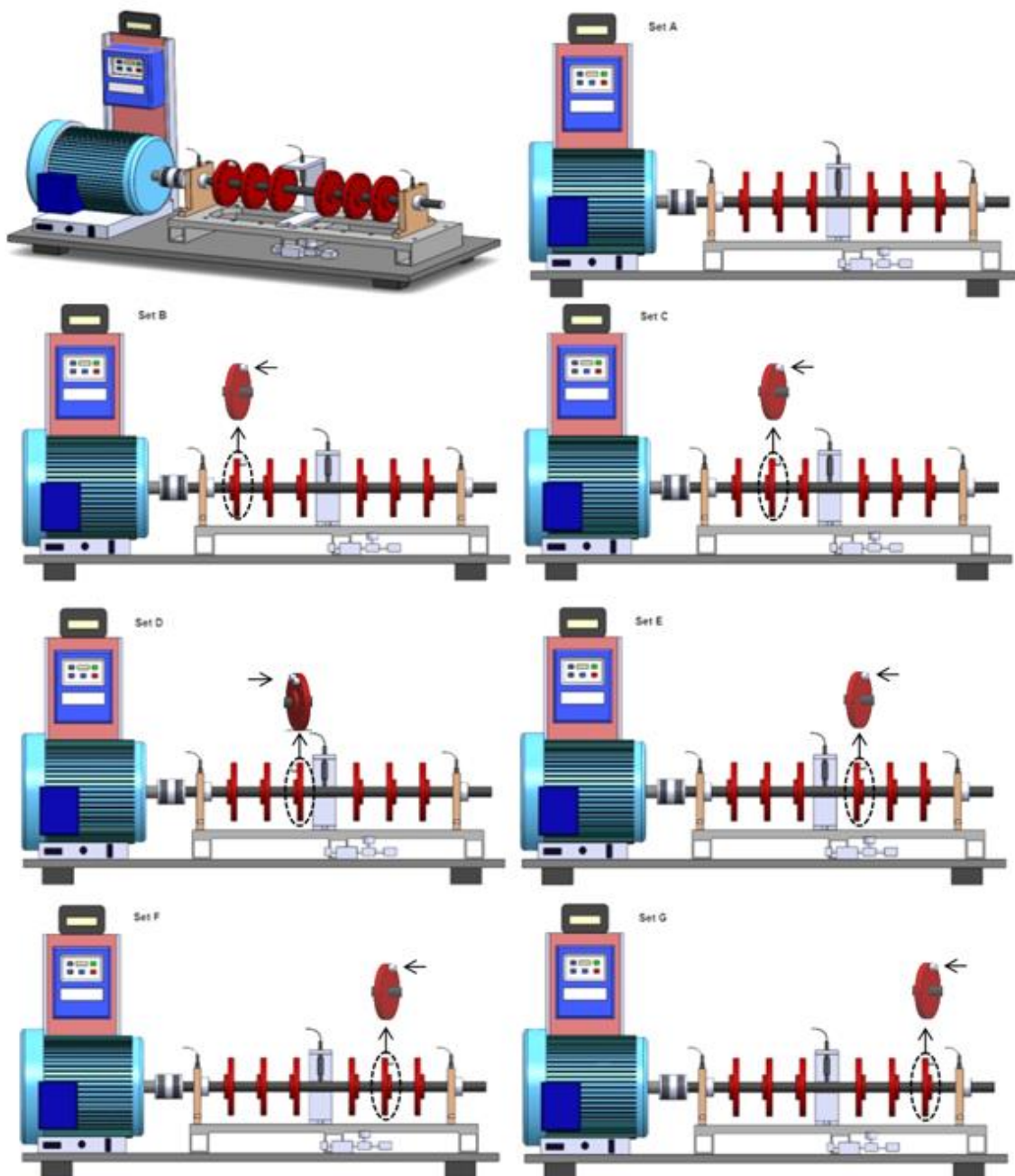


Fig. 2. Configurations of experimental setups

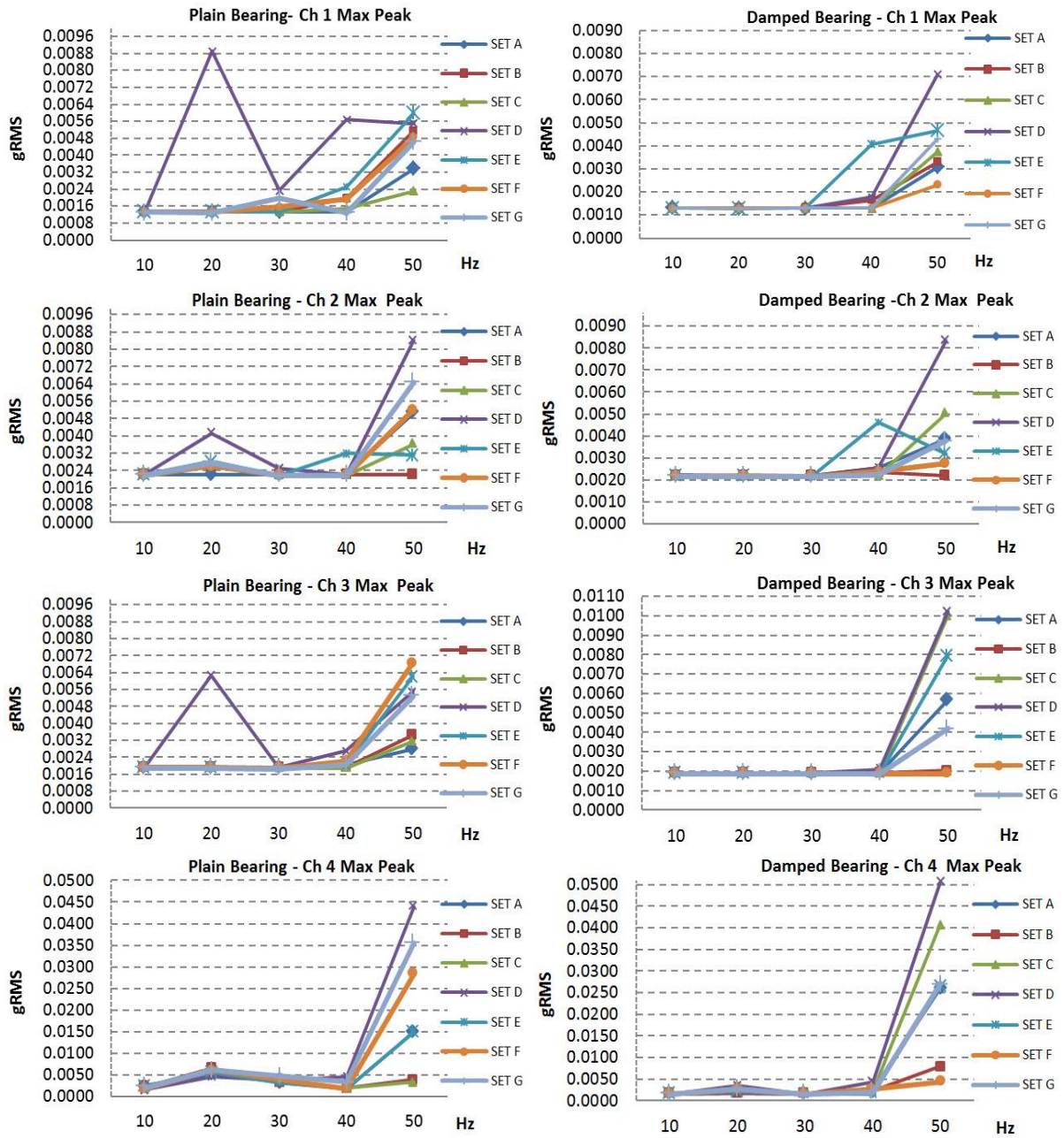


Fig.3. Maximum peaks of vibration spectrum versus shaft running speeds for all sets

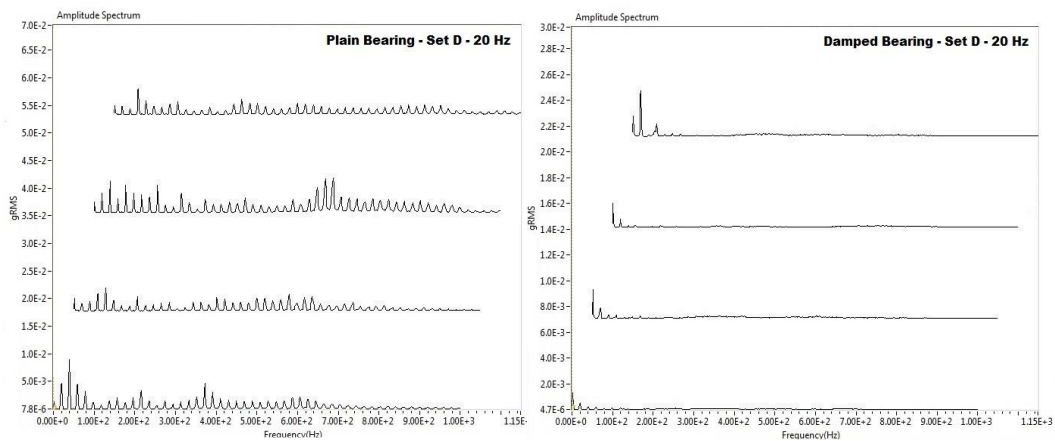


Fig. 4. The amplitude spectrum of bearing housing types for set D at shaft running speed of 20 Hz

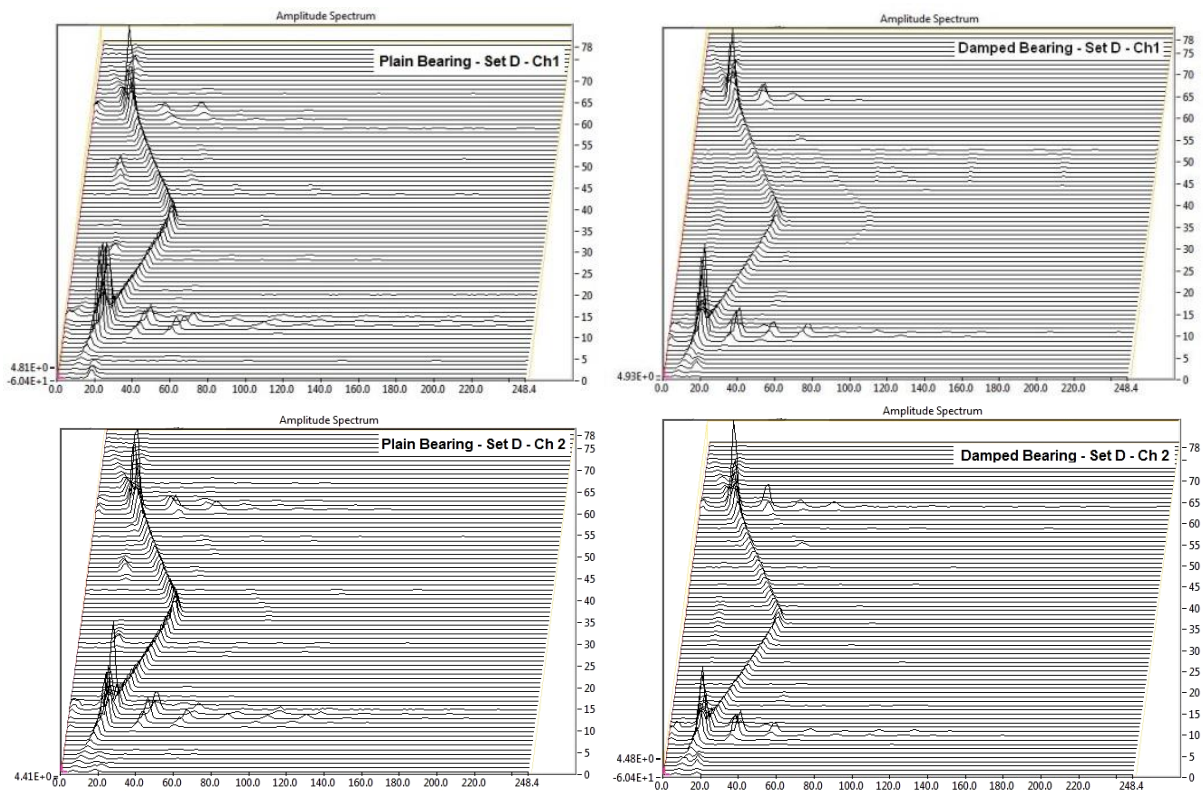


Fig. 5. Waterfall plot of run up and coast down in test cases for set D

Figure 5 shows the frequency waterfall in the vertical (Ch1) and horizontal (Ch2) directions for both plain and damped bearing housing. Set D is selected due to higher vibration. High vibration level was observed in both vertical and the horizontal direction of plain bearing case compare to the damped bearing. It can be seen that the surrounding isolator can damp some frequencies.

It can be noticed that a large frequency component of 1X causing 2X and 3X are barely recognized. Figure 6 shows the Bode plots of Set D during start-up processes. The speed controller allowed the system to operate in the range from 0 to 3000 rpm. The data were obtained by proximity probes for shaft running speed varying up to 3000 rpm. It can be seen that the maximum amplitude value in the vertical and horizontal directions for plain bearing is around 1400 rpm while for damped bearing is around 1200 rpm. It can be seen that vibration amplitudes of plain bearing housing are more propagating than the damped bearing housing.

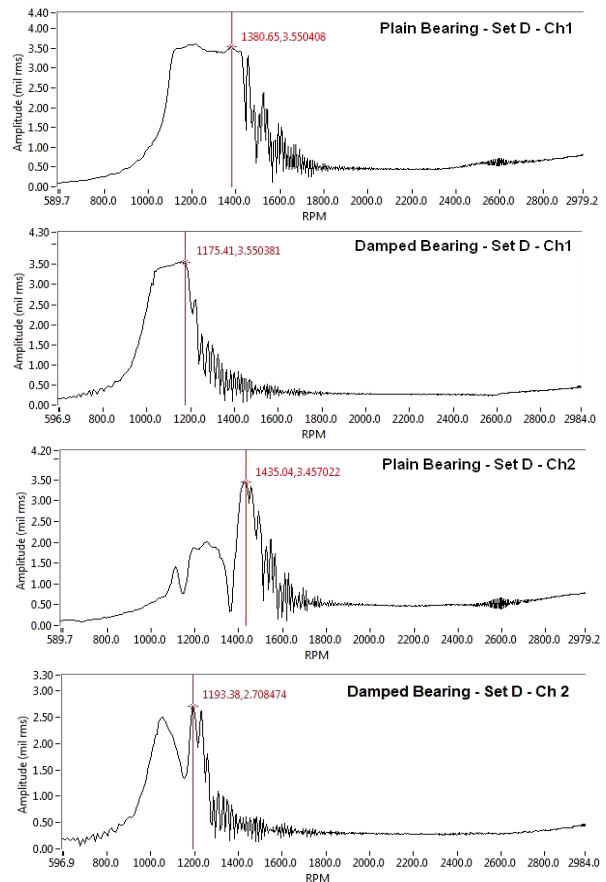


Fig. 6. Vibration amplitude values versus shaft running speeds

4. CONCLUSIONS

This study experimentally showed how the location of disk with respect to attaching unbalance screw and load position can significantly affect the dynamic behavior of shaft supported by plain and damped bearing housings. The experiment is mainly focused on the rotating machinery dynamic characteristics under unbalance conditions. The results showed that the location of the unbalance screw attached to the disk with respect to the load position can significantly affect the vibration response. The damped bearing housing can be used for reduction in rotor resonance amplitude where mass and stiffness cannot be used. The reduction of vibration transmission to the system can be obtained by applying an isolator between bearing and housing. Since damping is the most cost effective and appropriate means to attenuate resonant vibration, the damped bearing housing is less costly. The results show that the use of an isolator in the bearing housing can be very efficacious in rotating machinery vibration control.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to acknowledge the support of the University of Düzce for the project entitled BAP-2015.06.05.351. The main body of this article was presented at the 1st International Conference on Tribology (TURKEYTRIB'15).

REFERENCES

1. Arias-Montiel M., Silva-Navarro G. and Antonio-García A., "Active vibration control in a rotor system by an active suspension with linear actuators", *Journal of Applied Research and Technology*, 12(5): 898-907, (2014).
2. Dietl P., "Damping and stiffness characteristics of rolling element bearings - theory and experiment", *PhD Thesis*, Technical University of Vienna, Austria, (1997).
3. Zeillinger R, Springer H, Kötritsch H. "Experimental determination of damping in rolling bearing joints", *In Proceedings of 39th ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress*, Netherlands, (1994).
4. 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: 10.1177/0954408915578581, (2016).
5. Bavastri CA, Ferreira EMDS, Espíndola, JJD, Lopes EMDO., "Modeling of dynamic rotors with flexible bearings due to the use of viscoelastic materials", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 30(1): 22-29, (2008).
6. Dietl, P., Wensing, J. and Nijen, G. C., "Rolling bearing damping for dynamic analysis of multi-body systems - experimental and theoretical results", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 214(1): 33-43, (2000).
7. Wensing, J. A., "On the dynamics of ball bearings". *PhD Thesis*, University of Twente, Netherlands, (1998).
8. Taplak, H., Uzmay, İ. and Yıldırım Ş., "Design of artificial neural networks for rotor dynamics analysis of rotating machine systems", *Journal of Scientific and Industrial Research*, 64(6): 411, (2005).
9. Taplak, H, Erkaya, S. and Uzmay İ., "Experimental analysis on fault detection for a direct coupled rotor-bearing system", *Measurement*, 46(1): 336-344, (2013).
10. Arslan, H. and Aktürk, N., "An investigation of rolling element vibrations caused by local defects", *Journal of Tribology*, 130(4): 041101, (2008).

Determination of Contact Parameters of Au/n-Ge Schottky Barrier Diode with Rubrene Interlayer

Murat YILDIRIM*

Department of Biotechnology, Faculty of Science, Selçuk University, Konya, Turkey

(Received : 01.04.2016 ; Accepted: 25.04.2016)

ABSTRACT

Electrical characterization of an Au/n-Ge semiconductor Schottky diode with organic (rubrene) interface has been systematically carried out over a wide temperature range. In sample fabrication stage, first, the ohmic In contact has been performed on one surface of n-Ge wafer grown in direction of (100). Later, the other surface of the wafer has been coated with rubrene by spin-coating method and then the Schottky contact has been constituted on the organic material via thermal evaporation method. The current-voltage (*I-V*) characteristics of prepared Schottky diode has been measured at a temperature range of 150-300 K and it has been observed that the diode have a rather good rectification behavior at all temperature. By using the *I-V* characteristics, the idealite factor, barrier height and some other diode parameters have been calculated for all temperatures. These parameters have also been calculated by means of Cheung-Cheung method. Werner and Güttler's model has been employed to analyze the temperature dependence of barrier height and ideality factor at low temperatures. The standard deviation of the zero-bias barrier height was calculated as 120 mV and the voltage coefficients of the barrier height were determined as $\rho_2 = 0.184$ and $\rho_3 = 0.232$ mV. At high temperatures, the zero-bias barrier height decreases with increasing temperature because of the temperature dependence of semiconductor band gap. The non-linearity has been observed in the Richardson plot due to temperature dependence of the zero-bias barrier height. Richardson constant was determined by using different methods. Of the current-voltage analysis's has emerged an abnormal decrease of apparent barrier height and increase of ideality factor at low temperature. It is determined that these abnormalities result due to the barrier height inhomogeneities prevailing at the organic-semiconductor interface. As a result, homogeneities in Au/rubrene/n-Ge Schottky barrier diode can be successfully characterized by a Gaussian distribution.

Key words: Schottky Contacts, Rubrene Thin Film, Gaussian Distribution, Inhomogeneities.

1. INTRODUCTION

Electronic devices that are created on organic semiconductors are included in the field of organic electronics, and it has progressed at a rapid pace, and electronics based on organic thin-film materials could soon become a backbone of semiconductor technology. The performance of organic semiconductors is mainly connected to their molecular packing which contains the definitions of surfactant tail volume, tail length and equilibrium area per molecule, crystallinity which is the degree of structural order in a material, growth mode, and purity [1]. Holes and electrons in p orbitals are the typical charge carriers inorganic semiconductors. When our daily lives are considered, it is an undeniable fact that electronic devices are and will be an indispensable part of our lives. Semiconductor based materials are used in many of these devices which have been a permanent part of our lives. Among these, Schottky diodes produced by combining a metal and semiconductor material appear to be an indispensable item in the world of electronics together with big developments in the field of semiconductor based technologies and vacuum technology. When the fields in which these devices are used considered, we face with an extent whose borders are vague. Charge transport typically relies on the ability of the charge carriers to move from one molecule to another, which depends on the energy gap between

HOMO which is the highest occupied molecular orbital and LUMO which is the lowest unoccupied molecular orbital levels. The conduction band and the valance band are usually replaced by the LUMO and the HOMO, respectively. Especially in amorphous layers of organic semiconductor the density of states (DOS) is quite well represented by a Gaussian-like distribution of localized molecular orbitals of individual molecules [2]. These materials are either based on oligomers such as pentacene, anthracene, rubrene, or oligothiophenes, or on polymers such as polypyrrole, polyacetylene, poly(3-hexylthiophene)(P3HT), or poly(p-phenylene vinylene) (PPV) [3]. Djurovich et al. [4] have been presented the interrelationships between the LUMO energies of a variety of organic semiconductors measured by several techniques. These correlations allow us to evaluate the accuracies and advantages of the various methods, and to extract a relationship between the exciton binding energy and the energy gap.

Organic semiconductors have attracted much attention because of their fundamental scientific importance and impressive improvements in performance in a wide variety of commercial products based on organic light emitting diodes (OLEDs), organic photovoltaic cells (OPV) and organic field-effect transistors (OFETs) have entered the market. The future may see an even wider range of application for this technology [5]. One specific area that organic semiconductors is Schottky Barrier Diode application. The choice of the material that will be used in Schottky diode should be compatible with the conditions of the diode's scope of application. The fact

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: muratyildirim@selcuk.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 165-173

that germanium semiconductor has high electron mobility has caused it to be used commonly in high frequency applications. It is a great issue of interest to thoroughly comprehend the nature of the electrical characteristics of Schottky diode due to their technological importance. This point is of remarkable significance in terms of the fact that the produced circuit part should serve for the desired purpose. Moreover, knowing the behavior of produced diodes against sample temperature is an desideratum for them to operate in harmony with the temperature conditions to which application scopes depend on. Some certain operations have been carried out in order to obtain high quality productivity from Schottky diodes. Of these operations, the annealing process appears to be as an effect to increase the diode quality significantly. When this feature is considered, the effect of annealing temperature and how the annealing temperatures affect various features of the diode and resulting from this how the electronic features change are becoming important.

One of the most potential organic semiconductors is Rubrene ($C_{42}H_{28}$, 5,6,11,12-tetraphenylnaphthacene) because of its high electrical conductivity which is the ability of a material to conduct and mobility which is the ability of charged particles to move through a medium in response to electric field for technological applications like organic light emitting diodes (OLEDs) [6], organic photovoltaic (OPV) devices [7,8], thin film transistors (TFTs) [9], field effect transistors (FETs) [10], and so on. There are a number of experimental works on the effect of organic semiconductor material in device applications. However, we still do not know the temperature dependent Current–Voltage (I – V) characteristics of Au/rubrene/n-Ge structure. Therefore, electrical characteristics need to be studied in detail. In literature, very little experimental information is still available on the barrier formation at organic/inorganic semiconductor interfaces and the temperature dependent conduction mechanisms of the interfaces at a wide temperature range.

Analysis of the I – V characteristics of Schottky barrier diodes based on thermionic emission theory usually reveals an abnormal decrease in the barrier height and an increase in the ideality factor with decreasing temperature [11,12]. The standard thermionic emission theory fails to explain this result as it expects the Schottky barrier height variation to be controlled only by the variation of band gap with temperature [13]. Schottky barrier height in Schottky contacts is likely to be a function of the atomic structure, and the atomic inhomogeneities at metal-semiconductor interface, which are caused by grain boundaries, defects, multiple phases, etc. [14]. Analysis of I – V characteristics of Schottky barrier diodes at room temperature only does not give detailed information about their conduction process or the nature of barrier formation at the metal-semiconductor interface. The temperature dependence of the I – V characteristics allows us to understand different aspects of conduction mechanisms [15].

Recently, germanium has been considered to be a promising channel material for next-generation, high-mobility complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) devices in terms of overcoming the scaling limits of its Si counterpart. A major challenge in the realization of high-performance Ge-based CMOS devices is posed by the effect of strong Fermi-level pinning close to the valence band of Ge [16-18]. Lieten et al. [19] have investigated the current conduction of different metals which Al, Cr, Co, Au, and Pt on n-Ge for contacts. All contacts rectifying behavior. The electrical behavior of the junction for Au and Pt, the I – V characteristic remained clearly rectifying, on the other hand, for Al, Cr, and Co has a large influence on the I – V characteristics. For these metals, the junction has become Ohmic high current density both influence on the I – V characteristics.

The goal of this work is to investigate potential use of rubrene material for n-type Ge based electronic devices and determine the electrical properties of Au/rubrene/n-Ge diode. However despite the prominent features of Au/n-Ge Schottky barrier diodes, no detailed information about the Schottky interface with rubrene interlayer. such as temperature dependence of the Schottky barrier parameters still remains unclear, though this is required for the further enhancement of device performance. I – V measurements of Au/rubrene/n-Ge have been performed in the temperature range from 150 to 300 K. By using thermionic emission theory with a Gaussian distribution of the barrier heights around a mean value due to barrier height inhomogeneities prevailing at the metal-semiconductor interface the temperature dependence of the ideality factor and the barrier height are discussed. Furthermore, by means of admittance method, the series resistance and barrier height properties of the diode are determined.

2. EXPERIMENTAL PROCEDURE

The n-type Ge (100) substrate used in this study has a 500 μm thickness and 1-10 Ωcm resistivity. Initially, the substrate has been cleaned in methanol and acetone using ultrasonic agitation for 3 min and rinsed in de-ionized water (18 $\text{M}\Omega$). Firstly, The n-Ge substrate is cleaned using the Radio Corporation of America (RCA) cleaning method [15,20]. Ohmic contact with low resistance is made by evaporation of indium (In, 99.99% from Kurt J. Lesker) metal with thickness of 150 nm in 5×10^{-6} Torr on the backside of the n-Ge substrate and then by thermal annealing at 400 $^{\circ}\text{C}$ for 2 min in vacuum. The rubrene (from Sigma-Aldrich) which its chemical structure is shown in Fig.1(a) was dissolved in toluene with a concentration of 10 mg ml^{-1} . This solution was stirred for 5 min at a magnetic stirrer. The solution was prepared and kept in MBraun glovebox maintaining a N_2 environment. A rubrene organic film is prepared on the n-Ge substrate by the spin coating technique at a spinning rate of 1200 rpm for 60 s with a Laurell Spin Coater. This methods of the most common techniques for applying

thin films. The advantage of spin coating is its ability to quickly and easily produce very uniform films from a few nanometers to a few microns in thickness. Schottky contacts are prepared on rubrene organic film with a diameter of 2 mm by a metal shadow mask by evaporating gold (Au, 99.95% from Kurt J. Lesker) metal with thickness of 150 nm in 5×10^{-6} Torr. High purity In and Au metal contacts were thermally evaporated from a tungsten filament in a high vacuum coating unit (Edwards, E-306A) to form the bottom and top contact onto rubrene/n-Ge film surface, respectively. The schematic diagram of the prepared device is shown in Fig. 1(b). The I - V measurements were performed by a Keithley 2410 SourceMeter at temperature range from 150 to 300 K using an ARS Closed Cycle Cryostat Model DE202 AI and a Lake Shore model 331 temperature controller.

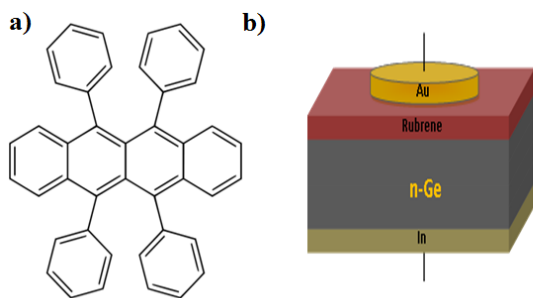


Fig. 1. (a) Molecular structure of 5,6,11,12-tetraphenyl-naphthalene (rubrene) organic compound. (b) Structure of Au/rubrene/n-Ge Schottky device for electrical characterization.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. Current–Voltage Characteristics of the Diode

Experimentally observed Current–Voltage (I - V) characteristics are mostly semi-logarithmic and they are compatible with thermionic emission theory. The I - V curves can be investigated by the following equations [21-23]:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right]; \quad I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (1)$$

where I_0 is saturation current, n is the diode quality factor, q is the electronic charge, A is the Schottky diode contact area, A^* is the effective Richardson constant and is equal to $143 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ for n-type Ge [24,25], T is the absolute temperature in Kelvin. I_0 is the saturation current derived from the straight line intercept of $\ln I$ at zero-bias. The Φ_B Schottky barrier height and n ideality factor values of Au/rubrene/n-Ge can be determined from intercepts and slopes of the voltage dependent of forward-bias $\ln I$ curve respectively, as [21,22,26]:

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad \text{and} \quad n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (2)$$

n equals to 1 for an ideal diode. However, n has usually a value greater than unity. High values of n can be attributed to the presence of the interfacial thin layer, a wide distribution of low-Schottky barrier height patches

(or barrier inhomogeneities) and to the bias voltage dependence of the Schottky barrier height [26].

Fig. 2 displays the I - V characteristics of the Au/rubrene/n-Ge diode in the temperature range of 150–300 K. The saturation current (I_0) values were determined from the linear portion intercept of $\ln I$ - V at $V=0$ in the temperature range of 150–300 K. These curves indicate a very strong temperature dependence of the Schottky diodes.

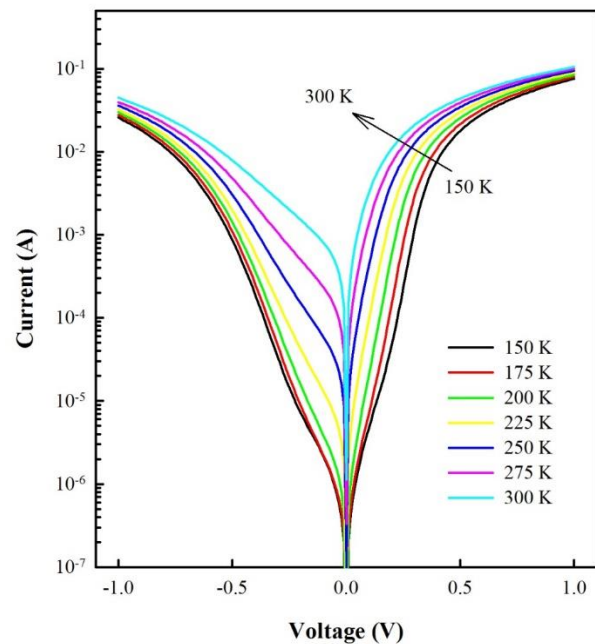


Fig. 2. Current-Voltage of characteristics of Au/rubrene/n-Ge Schottky barrier diode.

The values of saturation current (I_0) were obtained from the linear portion intercept of $\ln I$ - V at $V = 0$ in the temperature range of 150–300 K. The values of barrier height (Φ_B) were calculated according to this I_0 values. The calculated values of n and Φ_B for the Au/rubrene/n-Ge diode range from 2.398 and 0.360 eV (at 150 K) to 1.230 and 0.553 eV (at 300 K), respectively. Φ_B and n plots as a function of Au/rubrene/n-Ge diode are presented in Fig. 3. As seen in Fig. 3 the Schottky barrier height (Φ_B) decreases and the ideality factor (n) increases with decrease in temperature. Werner and Güttler [27] have suggested that such dependence is created by barrier inhomogeneity which can be caused by various interface properties, which, in turn, depends on different factors such as the metal, the deposition process, the surface treatment, and the surface defects density [27–29]. High n values can be attributed to the presence of the interfacial layer and lateral inhomogeneous barrier height distributions [30-36]. On the other hand, the large values of n are also referred to the existence of an organic layer [11,20,26,35,37] plus thin native oxide layer at metal semiconductor interface [38-41] or to the presence the actual conduction process dominating in the junction in literature.

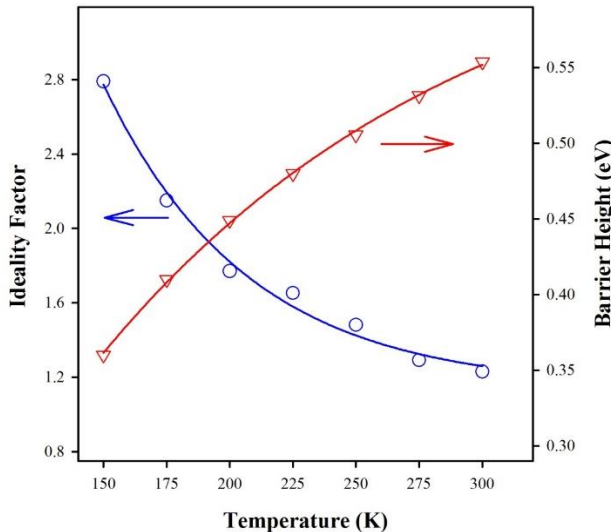


Fig. 3. Temperature dependence of ideality factor and barrier height of Au/rubrene/n-Ge Schottky barrier diode.

In Schottky diodes, the series resistance is one of the most important parameters governing the electrical properties of diodes. In order to determine the value of series resistance, we analyzed the $I-V$ characteristics of the diode using Cheung and Cheung model [42]. According to this method, the forward bias current-voltage characteristics due to the thermionic emission theory of Schottky contacts can be expressed as Eq. 1. If I_0 saturation current is substituted into this expression and then extracting the applied voltage V from the equation, one obtains

$$V = IR_s + n\Phi_B + \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (3)$$

By differentiating this equation with respect to I and rearranging we find that

$$\frac{dV}{d\ln(I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (4)$$

$dV/d\ln(I)$ versus I plot should yield straight lines in the downward curvature region of $\ln I - V$ plot in accordance with Eq. 4 and its slope gives the series

resistance (R_s) and its intercept on the current axis gives nkT/q .

To obtain barrier height (Φ_B), Cheung and Cheung defined a function as [15,20,42]

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_B + IR_s \quad (5)$$

In Fig. 4 we give the plots of $dV/d\ln(I)$ and $H(I)$ versus I for Au/rubrene/n-Ge Schottky diodes at room temperature. The values of R_s and n were calculated from $dV/d\ln(I)$ versus I curve, yielding $R_s=7.65$ and $n=1.25$ for Au/rubrene/n-Ge diode at room temperature. Similarly, the plot of $H(I)$ versus I gives the series resistance and the barrier height Φ_B . The values of Φ_B and R_s were calculated, yielding values of $\Phi_B=0.542$ eV and $R_s=7.66$ for Au/rubrene/n-Ge diode at room temperature. It should be noted that the value of n obtained from the $dV/d\ln(I)$ versus I curves is higher than that of the forward-bias $\ln I$ versus V plot. This can be attributed to the effect of series resistance, interface states and voltage drop across the interfacial layer [38-41].

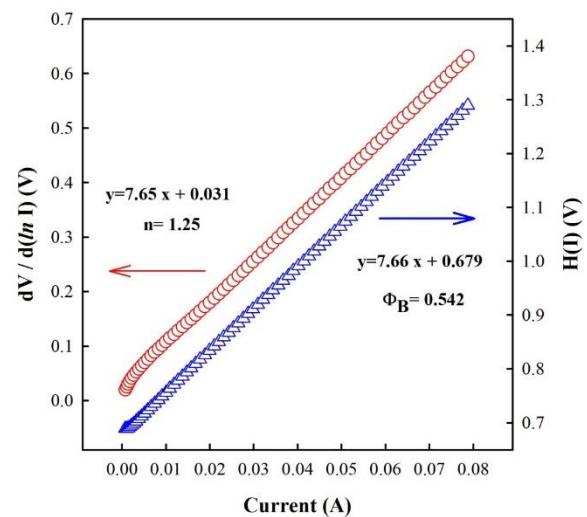


Fig. 4. $dV/d(\ln I)-I$ and $H(I)-I$ characteristics of Au/rubrene/n-Ge Schottky barrier diode at 300 K.

Table 1. Temperature dependent values of diode parameters determined by different methods for an Au/Rubrene/n-Ge Schottky barrier diode.

T(K)	$I-V$		$dV/d\ln(I) - I$		$H(I) - I$	
	n	Φ_B	n	R_s	Φ_B	R_s
150	2.39	0.360	1.92	8.18	0.386	8.18
175	2.15	0.403	1.66	7.96	0.433	7.96
200	1.77	0.450	1.51	7.82	0.466	7.93
225	1.65	0.479	1.49	7.75	0.484	7.82
250	1.48	0.505	1.46	7.71	0.502	7.72
275	1.29	0.531	1.34	7.69	0.525	7.71
300	1.23	0.553	1.25	7.65	0.542	7.66

The results obtained have been listed in Table 1. in the temperature range of 150–300 K, together with the n and Φ_B values calculated from the current-voltage

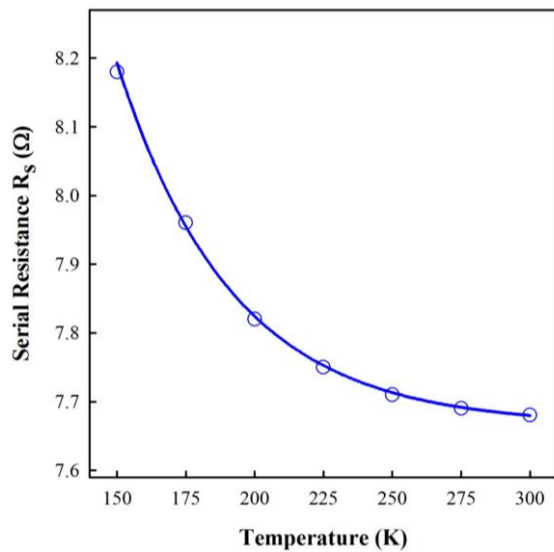


Fig. 5. Variation of R_s with temperature of Au/Rubrene/n-Ge Schottky barrier diode.

characteristics using Eqs. (4) and (5). As seen from the table, the values obtained by different techniques are in good agreement with each other. The variations of n and Φ_B with temperature have already been discussed above. On the other hand, the values of series resistance R_s calculated from the Cheung and Cheung plots decrease by increasing temperature as seen Fig. 5. This decreasing in R_s can be attributed to the decrease of n with increase of temperature and also to the rising of free carrier concentration at higher temperatures.

Chawanda et al. [43] have studied the electronic properties of the Au/n-Ge (100) Schottky contacts from their current–voltage characteristics at varying temperatures from 150 to 300 K. Khurelbaatar et al. [25] have fabricated the Au/n-Ge Schottky barrier diodes and investigated on their electrical properties using the current–voltage characteristics at room temperature. They have been cross-checked Schottky barrier properties of Au/n-Ge Schottky barrier diodes by various analysis techniques such as forward $I-V$, $C-V$, Cheung’s, and Norde’s methods. Chawanda et al. [43] and Khurelbaatar et al. [25] have determined effect of the

temperature on junction parameters n , Φ_B and R_s . This study results have been compared to theirs results and listed Table 2. for at room temperature values.

3.2. Analysis of Inhomogeneous Barrier Height of the Diode

Chand et al. [46,47] have analyzed Gaussian distribution of barrier heights in inhomogeneous Schottky diodes The current–voltage characteristics of inhomogeneous Schottky diodes have been generated by using analytically solved thermionic-emission diffusion equation incorporating Gaussian distribution of barrier heights and by direct numerical integration over a barrier height range [44]. The Schottky barrier height inhomogeneity of the Au/rubrene/n-Ge Schottky diode was considered by Gaussian distribution of the barrier heights [35, 45-52]. Werner and Güttler [13,27,45] have proposed that the abnormal behavior can be explained by assuming a Gaussian distribution of Schottky barrier height with a mean barrier height $\bar{\Phi}_{B0}$ (mean) and a zero-bias standard deviation σ_{s0} .

$$P(\Phi_{ap}) = \frac{1}{\sigma_{s0}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\Phi_B - \bar{\Phi}_{B0})^2}{2\sigma_{s0}^2}\right] \tag{6}$$

where $1/\sigma_{s0}\sqrt{2\pi}$ is the normalization constant of the Gaussian barrier distribution. The Gaussian distribution of the Schottky barrier height yields the following expression for experimental apparent Schottky barrier height at zero bias. Their relation in a simple form, proposed by Chand and Kumar [21,28,44,46,47,53] can be given as,

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{B0} - \frac{q\sigma_{s0}^2}{2kT} \tag{7}$$

where Φ_{ap} is the apparent barrier height measured experimentally. $\bar{\Phi}_{B0}$ and σ_{s0} are the mean Schottky barrier height and its standard deviation at zero-bias ($V=0$), respectively. The temperature dependence of σ_{s0} is usually small and can be neglected. The plot of Φ_{ap} versus $1/2kT$ (as show in Fig. 6) should be a straight line that gives $\bar{\Phi}_{B0}$ and σ_{s0} from the intercept and slope, respectively. The mean value $\bar{\Phi}_{B0}$ is 0.740 eV and standard deviation σ_{s0} equals to 120 mV, respectively. A low value of for homogeneous Schottky type contacts is expected. However, 120 mV value is not low and it confirms the presence of inhomogeneous barrier height for Au/rubrene/n-Ge device [13,27,46,54,55].

Table 2. Comparison of diode parameters determined for an Au/n-Ge and an Au/Rubrene/n-Ge Schottky barrier diodes.

	$I-V$		$dV/d\ln(I) - I$		$H(I) - I$		Ref.
	n	Φ_B	n	R_s	Φ_B	R_s	
Au/rubrene/n-Ge	1.23	0.553	1.25	7.65	0.542	7.66	This work
Au/n-Ge	1.34	0.590	1.48	7.01	0.470	7.14	[25]
Au/n-Ge	1.12	0.428	--	--	--	--	[42]
Au/n-Ge	1.10	0.610	--	--	--	--	[18]
Au/n-Ge	--	0.560	--	--	--	--	[44]

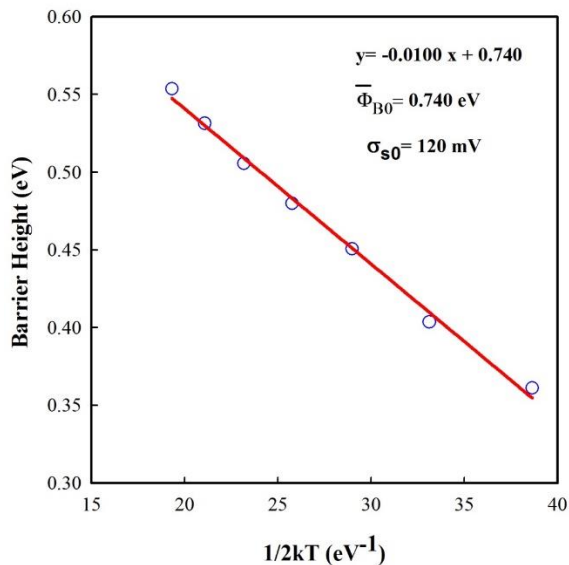


Fig. 6. Barrier height vs. $1/(2kT)$ curves for Au/rubrene/n-Ge Schottky barrier diode.

The observed variation of ideality factor with temperature in the model is given by [21,28,44,53]

$$\frac{1}{n_{ap}} - 1 = -\rho_2 + \frac{q\rho_3}{2kT} \tag{8}$$

where n_{ap} is the apparent ideality factor (experimental data) and the coefficients ρ_2 and ρ_3 quantify the voltage deformation of the barrier height distribution. The plot of n versus $1/2kT$ (as show in Fig. 7) should be straight line that gives voltage coefficients ρ_2 and ρ_3 from the intercept and slope respectively. The values of ρ_2 and ρ_3 were obtained 0.184 and 0.020 in 150– 300 K temperature ranges.

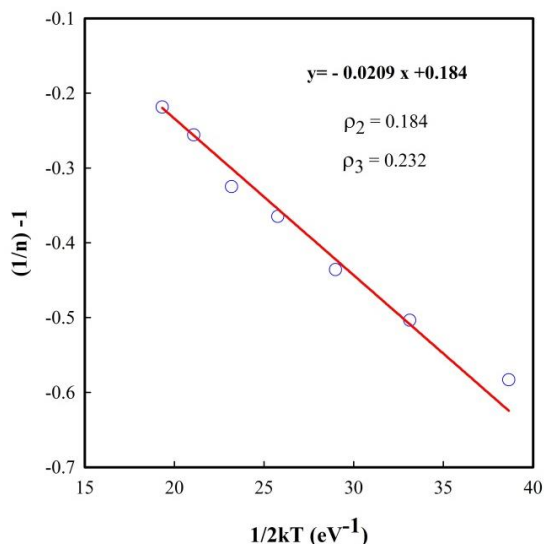


Fig. 7. Temperature dependence of ideality factor ($1/n^{-1}$) for Au/n-Ge Schottky barrier diode

The Φ_B is also determined by means of the conventional Richardson plot of the saturation current I_0 . In this case, Eq. (2) can be obtained as [20,26,31-40]

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{B0}}{kT} \tag{9}$$

The conventional activation energy experimental $\ln(I_0/T^2)$ vs. $1/kT$ plot (as show in Fig. 8) has showed nonlinearity behavior at low temperatures, as indicated above. $\ln(I_0/T^2)$ versus $1/kT$ should be a straight line that gives $\bar{\Phi}_{B0}$ and A^* from the intercept and slope, respectively. The values of $\bar{\Phi}_{B0}$ and A^* are 0.512 eV and $35 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ in 150–200 K temperature range and as 0.188 eV and $38 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ in 250–300 K temperature range. The A^* values are much lower than the theoretical value of $143 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ for n-Ge [24]. This deviation in Richardson plots may be due to the inhomogeneous barrier and potential fluctuations at the metal-semiconductor interface; that is, the current through the contact will flow preferably through the lower barriers [31,43,54].

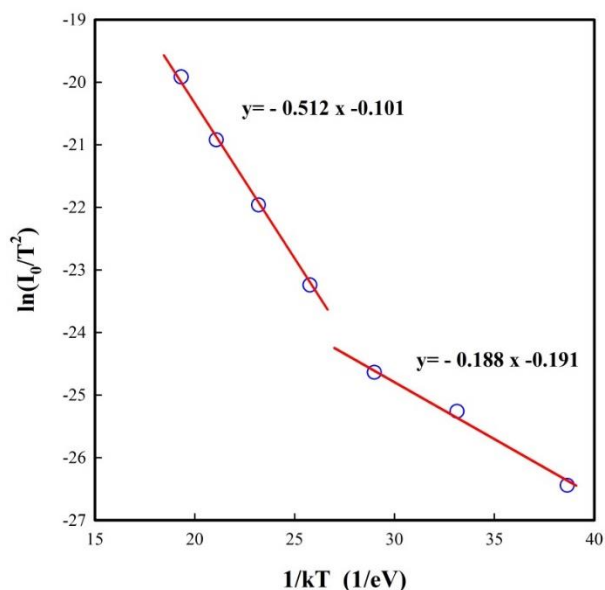


Fig. 8. $\ln(I_0/T^2)$ versus $1/kT$ plots for the Au/rubrene/n-Ge Schottky barrier diode according to two Gaussian distributions.

Since the conventional Richardson plot deviates from linearity at low temperatures due the barrier inhomogeneity, it can be modified by combining Eq. (1) and (7), to explain these discrepancies, according to the Gaussian distribution of the barrier height [26,35,43,56] we gets

$$\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2\sigma_s^2}{2k^2T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{B0}}{kT} \tag{10}$$

Using the experimental I_0 data, a modified $\ln(I_0/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ versus $1/kT$ plot according to Eq. (10) should give a straight line with the slope directly yielding the mean barrier height and the intercept ($= \ln AA^*$) at the ordinate determining A^* for a given diode area A . The $\ln(I_0/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ using two values of A^* and $\bar{\Phi}_{B0}$ obtained for temperature ranges of 150–300 K. The modified $\ln(I_0/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ versus $1/kT$ plots for the values of $\bar{\Phi}_{B0}$ and A^* are 0.816 eV and $121 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ have been given in Fig. 8. Richardson constant

value of A^* is very close to the theoretical value $143 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ [32]. $1/2kT$ plot at higher temperatures in Fig. 8. This value is smaller than the reported of $143 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$. This may be due to greater inhomogeneities at the interface.

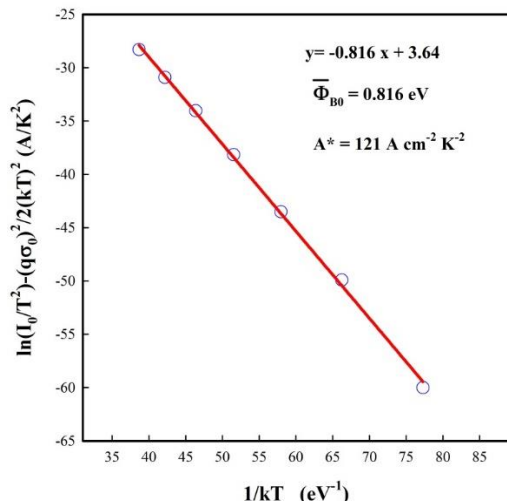


Fig. 9. Modified Richardson $\ln(I_0/T^2) - (q^2\sigma_s^2/2k^2T^2)$ versus $1/kT$ plots for the Au/rubrene/n-Ge Schottky barrier diode according to Gaussian distributions.

4. CONCLUSIONS

The spin coated grown monolayer rubrene was employed as the interlayer in Au/n-Ge Schottky barrier diodes. We investigated rubrene interlayer effects on Schottky barrier parameters such as ideality factor, barrier height, and series resistance of Au/n-Ge Schottky barrier diode. It is observed that, the electrical parameters strongly depend on the organic layer between the metal–semiconductor contacts. Increase in the temperature causes an exponential decrease in the ideality factor. It is clearly seen that the values decrease more rapidly at low temperatures. However, temperature has a lower effect on the determination of ideality factor values at high temperatures. It can be also estimated that the values become closer to its ideal value at very high temperatures. In contrast to ideality factor, it is observed that the potential barrier height values increase with the temperature and the variation of potential barrier height with temperature is linear and sensitively temperature dependent. Effect of temperature on the serial resistance values have been illustrated in the Fig. 5. To check accuracy of the results, Cheung–Cheung method is also employed to calculate the electrical properties. It can be said that the values are good agreement with those obtained from I – V method. In order to obtain evidence of a Gaussian distribution of barrier heights, we have plotted Φ_B vs. $1/2kT$ graphs, and from which the of value $\Phi_{B0}=0.740 \text{ eV}$ and $\sigma_{s0}=120 \text{ mV}$ for barrier heights with a mean barrier height and standard deviation respectively, have been obtained. Our results show that organic interlayer is a particularly important factor that

influences the electronic properties of a diode system, depending on the temperature and the n-Ge wafer. We found that the rubrene interlayer could improve Au/n-Ge Schottky barrier diode properties to enable high quality Ge and rubrene devices with Schottky contacts in the future.

ACKNOWLEDGEMENT

This work is supported by Selçuk University BAP office with the Research Project number 15401014. The author acknowledge Assoc. Prof. Dr. Ö.F. YÜKSEL for fruitful discussion and valuable contribution in experiment measurement.

REFERENCES

- [1] Virkar, A. A., Mannsfeld, S., Bao, Z. and Stingelin, N. "Organic Semiconductor Growth and Morphology Considerations for Organic Thin-Film Transistors", *Advanced Materials*, 22: 3857-3875, (2010).
- [2] Schmechel, R. and von Seggern, H. "Electronic traps in organic transport layers", *Physica Status Solidi (a)*, 201: 1215-1235, (2004).
- [3] Mishra, A. and Bäuerle, P. "Small Molecule Organic Semiconductors on the Move: Promises for Future Solar Energy Technology", *Angewandte Chemie International Edition*, 51: 2020-2067, (2012).
- [4] Djurovich, P. I., Mayo, E. I., Forrest, S. R. and Thompson M. E. "Measurement of the lowest unoccupied molecular orbital energies of molecular organic semiconductors", *Organic Electronics*, 10: 515-520, (2009).
- [5] Wohlgenannt, M. "Organic magnetoresistance and spin diffusion in organic semiconductor thin film devices", *Physica Status Solidi RRL*, 6: 229-242, (2012).
- [6] Huang, L.S. and Chen, C.H. "Recent progress on molecular organic electroluminescent materials and devices", *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 39: 143-222, (2002).
- [7] Chan, M.Y., Lai, S.L., Fung, M.K., Lee, C.S. and Lee, S.T. "Doping-induced efficiency enhancement in organic photovoltaic devices", *Applied Physics Letters*, 90: 023504, (2007).
- [8] Karak, S., Lim, J. A., Ferdous, S., Duzhko, V. V. and Briseno, A. L. "Photovoltaic Effect at the Schottky Interface with Organic Single Crystal Rubrene", *Advanced Functional Materials*, 24: 1039-1046, (2014).
- [9] Chen, Y. and Shih, I. "High mobility organic thin film transistors based on monocrystalline rubrene films grown by low pressure hot wall deposition", *Applied Physics Letters*, 94: 083304, (2009).
- [10] Horowitz, G. "Organic Field-Effect Transistors", *Advanced Materials*, 10: 365-377, (1998).
- [11] Dökme, İ. and Altındal, Ş. "On the intersecting behavior of experimental forward bias current-voltage (I - V) characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Schottky diodes at low temperatures", *Semiconductor Science and Technology*, 21: 1053-1058, (2006).
- [12] Karataş, Ş., Altındal, Ş. and Çakar, M. *Physica B*, 357: 386-397, (2005).

- [13] Werner, J.H. and Guttler, H.H. "Temperature dependence of Schottky barrier heights on silicon", *Journal of Applied Physics*, 73: 1315-1319, (1993).
- [14] Cimili, F.E., Sağlam, M., Efeoğlu, H. and Türüt, A. "Temperature-dependent current-voltage characteristics of the Au/n-InP diodes with inhomogeneous Schottky barrier height", *Physica B*, 404: 1558-1562, (2009).
- [15] Yüksel, Ö. F. "Temperature dependence of current-voltage characteristics of Al/p-Si (100) Schottky barrier diodes", *Physica B*, 404: 1993-1997, (2009).
- [16] Wu, J. R., Wu, Y.H., Hou, C.Y., Wu, M.L., Lin, C.C. and Chen, L.L. "Impact of fluorine treatment on Fermi level depinning for metal/germanium Schottky junctions", *Applied Physics Letters*, 99: 253504, (2011).
- [17] Janardhanam, V., Yun, H.J., Lee, J., Reddy, V. R., Hong, H., Ahn, K.S. and Choi, C.J. "Depinning of the Fermi level at the Ge Schottky interface through Se treatment", *Scripta Materialia*, 69: 809-811, (2013).
- [18] Khurelbaatar, Z., Kang, M., Shim, K., Yun, H., Lee, J., Hong, H., Chang, S., Lee, S. and Choi C. "Temperature dependent current-voltage characteristics of Au/n-type Ge Schottky barrier diodes with graphene interlayer", *Journal of Alloys and Compounds*, 650: 658-663, (2015).
- [19] Lieten, R. R., Degroote, S., Kuijk, M. and Borghs G. "Ohmic contact formation on n-type Ge", *Applied Physics Letters*, 92: 022106, (2008).
- [20] Şimşir, N., Şafak, H., Yüksel, Ö.F. and Kuş, M. "Investigation of current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Ag/perylene-monoimide/n-GaAs Schottky diode", *Current Applied Physics*, 12: 1510-1514, (2012).
- [21] Chand S. and Kumar, J. "Current-voltage characteristics and barrier parameters of Pd₂Si/p-Si(111) Schottky diodes in a wide temperature range", *Semiconductor Science and Technology*, 10: 1680-1688, (1995).
- [22] Rhoderick, E. H. "Metal-Semiconductor Contacts", *Clarendon*, Oxford, UK, (1978).
- [23] Sze, S.M. "Physics of Semiconductor Devices", *John Wiley and Sons*, New York, USA, (1981).
- [24] Zhiqiang, L., Xia, A., Quanxin, Y., Meng, L., Xing, Z. and Ru, H. "Tuning Schottky Barrier Height in Metal/n-Type Germanium by Inserting an Ultrathin Yttrium Oxide Film", *ECS Solid State Letters*, 1: Q33-Q34, (2012).
- [25] Khurelbaatar, Z., Kil, Y., Yun, H., Shim, K., Kim, K., Lee, S., Choi, C. and Nam, J. T. "Modification of Schottky barrier properties of Au/n-type Ge Schottky barrier diode using monolayer graphene interlayer", *Journal of Alloys and Compounds*, 614: 323-329, (2014).
- [26] Güzeldir B., Sağlam, M., Ateş, A. and Türüt, A. "Determination of the some electronic parameters of nanostructure copper selenide and Cu/Cu₃Se₂/n-GaAs/In structure", *Journal of Alloys and Compounds*, 627: 200-205, (2015).
- [27] Werner, J.H. and Guttler, H.H. "Barrier inhomogeneities at Schottky contacts", *Journal of Applied Physics*, 69: 1522-1533, (1991).
- [28] Kumar, A., Vinayak, S. and Singh, R. "Micro-structural and temperature dependent electrical characterization of Ni/GaN Schottky barrier diodes", *Current Applied Physics*, 13: 1137-1142, (2013).
- [29] Kalinina, E.V., Kuznetsov, N.I., Dmitriev, V.A., Irvine, K.G. and Carter, C.H. J. "Schottky barriers on n-GaN grown on sic", *Journal of Electronic Materials*, 25: 831-834, (1996).
- [30] Vural, Ö., Şafak, Y., Altındal, Ş. and Türüt, A. "Current-voltage characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs structures in the wide temperature range", *Current Applied Physics*, 10: 761-765, (2010).
- [31] Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., Şafak, H., Nalçacıgil, Z. and Karadeniz, S. "Analysis of temperature dependent electrical properties of Au/perylene-diimide/n-Si Schottky diodes", *Thin Solid Films*, 534: 614-620, (2013).
- [32] Bengi, A., Altındal, Ş., Özçelik, S., Agaliyeva, S.T. and Mammadov, T.S. "Analysis of temperature dependent electrical characteristics of Au/n-GaAs/GaAs structures in a wide temperature range", *Vacuum*, 83: 276-281, (2009).
- [33] Altuntaş, H., Altındal, Ş., Özçelik, S. and Shtrikman, H. "Electrical characteristics of Au/n-GaAs Schottky barrier diodes with and without SiO₂ insulator layer at room temperature", *Vacuum*, 83: 1060-1065, (2009).
- [34] Yüksel, Ö.F., Kuş, M., Şimşir, N., Şafak, H., Şahin, M. and Yenel, E. "A detailed analysis of current-voltage characteristics of Au/perylene-monoimide/n-Si Schottky barrier diodes over a wide temperature range", *Journal of Applied Physics*, 110: 024507, (2011).
- [35] Barış, B., Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N. and Karadeniz, S. "Double barrier heights in 5, 6, 11, 12-tetraphenyl naphthalene (rubrene) based organic Schottky diode", *Synthetic Metals*, 180: 38-42, (2013).
- [36] Güllü, Ö., Aydoğan, Ş. and Türüt, A. "Electronic parameters of high barrier Au/Rhodamine-101/n-InP Schottky diode with organic interlayer", *Thin Solid Films*, 520: 1944-1948, (2012).
- [37] Soylu, M., Abay, B. and Onganer, Y. "Electrical characteristics of Au/Pyronine-B/moderately doped n-type InP Schottky structures in a wide temperature range" *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 5105-5111, (2011).
- [38] Tuğluoğlu, N., Karadeniz, S. and Altındal, Ş. "Effect of series resistance on the performance of silicon Schottky diode in the presence of tin oxide layer", *Applied Surface Science*, 239: 481-489, (2005).
- [39] Şahin, M., Şafak, H., Tuğluoğlu, N. and Karadeniz, S. "Temperature-dependent of current-voltage characteristics of Ag/p-SnS Schottky barrier diodes", *Applied Surface Science*, 242: 412-418, (2005).
- [40] Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Şahin, M. and Şafak, H. "Series resistance calculation for Ag contacts on single crystal layered p-SnS and p-SnSe compound semiconductors in the wide temperature range", *Microelectronic Engineering*, 81: 125-131, (2005).
- [41] Tuğluoğlu, N., Yakuphanoglu, F. and Karadeniz, S. "Determination of the interface state density of the In/p-Si Schottky diode by conductance and capacitance-frequency characteristics", *Physica B: Condensed Matter*, 393: 56-60, (2007).
- [42] Cheung, S.K. and Cheung, N.W. "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage

- characteristics”, *Applied Physics Letters*, 49: 85–87, (1986).
- [43] Chawanda, A., Mtangi, W., Auret, F. D., Nel, J., Nyamhere, C. and Diale M. “Current–voltage temperature characteristics of Au/n-Ge (1 0 0) Schottky diodes”, *Physica B: Condensed Matter*, 407: 1574-1577, (2012).
- [44] Murakami, H., Fujioka, T., Ohta, A., Bando, T., Higashi, S. and Miyazaki S. “Characterization of interfaces between chemically cleaned or thermally oxidized germanium and metals”, *ECS Transactions*, 33: 253-262, (2010).
- [45] Güttler, H.H. and Werner, J.H. “Influence of barrier inhomogeneities on noise at Schottky contacts”, *Applied Physics Letters*, 56: 1113-1115, (1990).
- [46] Chand, S. and Kumar, J. “On the existence of a distribution of barrier heights in Pd₂Si/Si Schottky diodes”, *Journal of Applied Physics*, 80: 288-294, (1996).
- [47] Chand, S. and Kumar J., “Current transport in Pd₂Si/n-Si(100) Schottky barrier diodes at low temperatures”, *Applied Physics A*, 63: 171-178, (1996).
- [48] Gümüş, A., Türüt, A. and Yalçın, N. “Temperature dependent barrier characteristics of CrNiCo alloy Schottky contacts on n-type molecular-beam epitaxy GaAs”, *Journal of Applied Physics*, 91: 245-250, (2002).
- [49] Yıldırım, N., Ejderha, K., and Türüt, A. “On temperature-dependent experimental I - V and C - V data of Ni / n -GaN Schottky contacts”, *Journal of Applied Physics*, 108: 114506, (2010).
- [50] Schmitsdorf, R.F., Kampen, T.U. and Mönch, W. “Correlation between barrier height and interface structure of AgSi (111) Schottky diodes”, *Surface Science*, 324: 249-256, (1995).
- [51] Mönch, W. “Barrier heights of real Schottky contacts explained by metal-induced gap states and lateral inhomogeneities”, *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 17: 1867-1876, (1999).
- [52] Farag, A.A.M. and Yahia, I.S. “Rectification and barrier height inhomogeneous in Rhodamine B based organic Schottky diode”, *Synthetic Metals*, 161: 32-39, (2011).
- [53] Chand, S. and Kumar, J. “Effects of barrier height distribution on the behavior of a Schottky diode”, *Journal of Applied Physics*, 82: 5005-5010, (1997).
- [54] Yüksel, Ö.F., Tuğluoğlu, N., Gülveren, B., Şafak, H. and Kuş, M. “Electrical properties of Au/perylene-monoimide/p-Si Schottky diode”, *Journal of Alloys and Compounds*, 577: 30-36, (2013).
- [55] Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R.L., Laflere, W.F. and Cardon, F. “On the difference in apparent barrier height as obtained from capacitance-voltage and current-voltage-temperature measurements on Al/p-InP Schottky barriers”, *Solid State Electronics*, 29: 633-638, (1986).
- [56] Çaldıran, Z., Aydoğan, Ş., Yeşildağ, A., Ekinçi, D., Kurudirek, S.V. and Türüt A. “Temperature-dependent current–voltage measurements of Au/C₉H₇N/p-Si: Characterization of a metal–organic-semiconductor device”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 34: 58-64, (2015).

Android Mobil Uygulamalar için İzin Karşılaştırma Tabanlı Kötücül Yazılım Tespiti

Recep Sinan ARSLAN, İbrahim Alper DOĞRU, Necaattin BARIŞCI*

Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

(Geliş/Received : 21.05.2016 ; Kabul/Accepted : 20.06.2016)

ÖZ

Mobil uygulamalar izin tabanlı modelleri sayesinde kendi güvenlik ve gizlilik modellerini oluştururlar. Uygulamalar, yüklendikleri mobil araçlarda herhangi bir hassas veriye erişmek isterlerse, bu erişim için sadece ihtiyaç duydukları izinleri tanımlamalıdır. Ancak bazı uygulamalar, gerek duyacakları izinlerin haricinde fazladan izin talebinde bulunmakta ve bunu daha sonra yapacakları şüpheli kaynak erişimleri için kullanabilmektedirler. Bu çalışmada belirlenen yöntem ile veri setleri kullanılarak daha önceden belirlenen seviyeler doğrultusunda uygulamaların risk değerleri belirlenmektedir. Statik analiz ve kod analizi metodlarını birlikte kullanılmıştır. Kullanılan yaklaşıma göre uygulamaların istedikleri ve kullandıkları izinler belirlenmekte ve fazladan izin talebinde bulunan uygulamalar çıkarılmaktadır. Sonrasında ortaya konulan formül sayesinde her bir uygulama için şüphe değeri belirlenmekte ve bu değere göre uygulamalar kötücül veya zararsız olarak sınıflandırılmaktadır. Ortaya konulan bu yaklaşım, var olan veri setleri üzerinde uygulanarak sonuçları karşılaştırılmış ve doğruluk seviyesi belirlenmiştir. Android işletim sistemi için, geliştirilen bu yeni yöntem sayesinde kötücül yazılımların tespit edilmesi ve kullanıcılar açısından daha güvenli bir Android ortamının oluşturulması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Android, İzin Tabanlı, Güvenlik, Risk Değerlendirmesi.

Permission Comparison Based Malware Detection System for Android Mobile Applications

ABSTRACT

Mobile applications create their own security and privacy models through permission based models. Applications, if they require to access any sensitive data in mobile devices that they are downloaded on, in order to do the needed system call for this access, they have to define only required permissions. However, some applications may request extra permissions which they do not need and may use these permissions for suspicious database access they do later. In this study, the aim is to determine those extra requested permissions and to use this on the security and privacy model. According to the study, through the determined methodology, risk values of applications are determined in the light of pre-determined levels within datasets. It is an approach that uses static analysis and code analysis together. According to this approach, the permissions that the applications request and use are determined separately and the applications that request extra permissions are discovered. Then, via the produced formula, suspicion value of every application is determined and applications are classified as malicious or benignant according to this value. This approach was applied on existing datasets; the results were compared and accuracy level was determined. For Android operating system, it is aimed to determine the malicious applications via this newly developed method and to create a safer Android atmosphere for users.

Keywords: Android, Permission Based, Security, Risk Assessment.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Modern iletişim teknolojilerinin gelişimi ile birlikte, akıllı telefon, tablet bilgisayar, multimedya merkezleri, ev uygulamaları gibi insanların hayatlarının içine girmiş akıllı ve kişiselleştirilmiş servisler sunan mobil araç/platformlarının ortaya çıkması hızlanmıştır [1]. Günümüzde, artık çok rahatlıkla mobil cihaz kullanımının kablolu bağlantı türlerini geçtiği söylenebilir. Mobil araç kullanımının yaygınlaşması, kullanıcıların kişisel/gizli verilerini, banka hesap numaraları gibi kritik bilgilerini mobil araçları üzerinde saklamalarındaki artışı beraberinde ge-

tirmiştir. [2][3]. Bunun gibi nedenlerle, mobil araç geliştiricileri, mobil araç işletim sistemi geliştiricileri, mobil uygulama market sahipleri, uygulama geliştiricileri ve devletler kullanıcıların mobil araçlarda karşılaşılabilecekleri kötü durumları önlemek için bu alandaki açık kapıları kapatma ve önlem alma çalışmalarını yürütmektedirler [4].

Mobithinking'in 2013 yılında yayınlamış olduğu verilere göre mobil internet kullanımı kablosuz internet kullanımını geçmiştir. Bunun nedenini sadece akıllı telefonların ve altyapıların gelişimi olarak görmek eksik olacaktır. Bu noktada, akıllı telefonlar için yeni uygulamalar sunan Google Play, Apple Store gibi uygulama marketlerin varlığı göz ardı edilemez. Bu uygulama marketleri sayesinde, kullanıcılar talep ettikleri işlevleri/fonksiyonları

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: nbarisci@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 175-189

yerine getirebilecek uygulamaları çoğu hallerde ücretsiz olarak bu uygulama marketlerinden indirebilmekte ve telefonlarında kullanabilmektedirler. Bu da kullanıcıların mobil araçları daha fazla kullanma eğilimi göstermelerine neden olmaktadır [5].

Mobil telefonlarda Nokia Symbian, Windows Phone, IOS, Blackberry OS ve Android işletim sistemi en yaygın kullanılan mobil işletim sistemleri arasındadır. Bu işletim sistemleri arasında, Android işletim sistemi açık kaynak kodlu olarak sunulan ve Linux çekirdek yapısını kullanan bir işletim sistemidir. Bu işletim sisteminin kullanılması için herhangi bir ücret talep edilmez. Sadece kullanıcılar geliştirdikleri uygulamaları satmak için markete koymak istediklerinde, geliştirici türünde bir market hesabı açmaları gereklidir. Android işletim sistemi diğer işletim sistemleri arasında açık kaynak kodlu ve ücretsiz erişime sahip olması nedeniyle en yüksek market payına ve satış miktarına sahiptir ve bu durum hızlı bir şekilde yükseliş göstermektedir [6].

Mobil araçların kullanımının yaygınlaşması, kişilerin artık daha fazla kişisel ve kritik verilerini mobil araçlarında saklıyor olmaları ve Android işletim sisteminin de temelde ücretsiz ve açık kaynak kodlu olması sebebiyle en geniş kullanım ağına sahip olması, Android tabanlı mobil araçları kötüçül uygulama geliştiricileri için bir hedef haline getirmektedir. Kullanıcıların Google Play benzeri uygulama dağıtım ortamlarından istenilen her türde programın herhangi bir ekstra çalışmaya gerek duymadan, indirilip kullanabilmeleri mümkündür. Her ne kadar bunun gibi büyük ölçekli uygulama havuzları, uygulamayı kullanıcılara sunmadan bir ön güvenlik kontrolünden geçirmekte iseler de, bu platformlarda dağıtım yapılan uygulamalar için tam bir güvenlik söz etmek mümkün değildir. "Google Bouncer" benzeri ön güvenlik kontrol sistemleri mümkün olduğunca uygulama marketi güvenliğinin sağlanması rolünü üstlenmektedirler. Ancak tam bir güvenliğin sağlanamadığını ortamlarda kullanıcılar açısından daha dikkatli olunması noktasında hassas bir durum sergilenmesi gerekliliği açıktır [5].

Uygulama marketlerinde dağıtım yapılan ve kullanıcılara sunulan uygulamalar incelendiğinde, birçok uygulamanın çalışması için gerek duyduğu izin sayısından daha fazla izin talebinde bulunduğu görülmüştür. Uygulamanın ihtiyaç duyduğundan daha fazla izin talebinde bulunması kullanıcılara zarar verebilecek bir nitelikte olabileceğini düşündürmektedir. Bu doğrultuda, uygulamalar ihtiyaç duyulabilecek ve özel olarak belirlenmiş bazı gereksiz izinleri de talep ederek, şüpheli bir hale gelmektedirler. Bu şekilde markette sunulan ve ihtiyaç duymayacağı izinleri de talep eden uygulamalar kullanıcılar tarafından indirilerek mobil araçlarına yüklenebilmektedir. Bu noktada bu tarz uygulamaların ayrıca takip edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Bunun yanında kullanıcılar mobil araçlarına uygulama marketlerinin haricinde de uygulamalar yükleyerek kullanabilmektedirler(3. Parti servisler). Bu nedenle, uygulama havuzlarında izin kullanımına yönelik kısmen sağlanabilecek güvenlik mekanizmalarının kolaylıkla atlatılabileceğini, farklı servisler

yardımıyla kullanıcılara sorunlar çıkartılabileceğini göstermektedir [1].

Uygulamaların ihtiyaç duyduklarından daha fazla izin talebinde bulunmaları halinde tespit edilmelerinin sağlanması için bir kaç farklı yaklaşım bulunmaktadır. Bu yöntemler sayesinde uygulamalar izlenerek; şüpheli olarak değerlendirilen ve hariçten izin talebinde bulunan bu uygulamaların kötüçül olup olmadıklarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu yöntemlere kısaca bakacak olursak; birincisi ve en temel kullanılan yöntem statik analiz metodolojisidir. Buna göre uygulamanın henüz çalıştırılmadan izinleri ve kaynak kodları incelenerek analiz edilirler. Bu şekilde uygulamanın hariçten izin isteyip istemediği, istiyor ise nedeni bulunmaya çalışılır [7][8][9]. İkinci yöntem dinamik analiz metodudur. Buna göre incelenmek istenen uygulama bir benzetimlik üzerinde koşularak, hangi izinleri hangi kaynaklara erişmek için kullandığı tespit edilmeye çalışılır. Böylece, uygulamanın servis çağrı karakteristiği ve erişim stratejisi belirlenerek uygulamanın kötüçül bir aktiviteye yönelip yönelmediği ortaya konulmaya çalışılır [10][11]. Üçüncü yöntem, 3. parti yazılımları kullanarak mobil araçlardaki tüm uygulamaların hangi kaynaklara eriştiklerini ve hangi izinleri kullandıklarını listelemedir. Böylece, daha önce yüklenen veya gözden kaçmış olan bir uygulama var ise tespit edilerek kötüçül aktiviteleri gözlemlenebilecektir. Dördüncü yöntem ise işletim sistemi ayrıcalık engelidir. Buna göre, işletim sistemleri uygulamalarının bazı kişisel verilere erişim sağlayıp sağlamadıkları kontrol edilebilmektedir. Örneğin, Android kullanıcılara böyle bir imkân tanımaktadır. Kullanıcılar herhangi bir marketten veya doğrudan üçüncü parti bir uygulamayı indirip kurmak istediklerinde, uygulamanın hangi izinleri talep ettikleri ve hangi kaynaklara erişmek istediklerine dair bir liste göstermektedir. Uygulamaların mobil araçlara yüklenmesi ancak kullanıcıların bu listeyi onaylamaları sonrasında mümkün olmaktadır. Böylece, bir ön güvenlik sistemi sağlanarak kullanıcılar bilgilendirilebilmektedir. Tüm bu teknikler bazı güvenlik çözümleri üretseler de, uygulamanın ihtiyaç duyduğundan daha fazla izin isteyip istemediğine dair bir sonuç çıkarmak için ortogonal metodların izlenmesi gereklidir [5].

Bu çalışmada, uygulamaların ihtiyaç duyulandan fazla izin talebinde bulunup bulunmadıkları, bulundular ise bunu kullanıp kullanmadıkları analiz edilerek bir kötüçül yazılım tespit aracı geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşıma göre, statik analiz metodunun avantajları ile birlikte kaynak kod analizi yapılarak uygulamanın potansiyel kötüçül risk durumuna ilişkin bir değerlendirme sonucu sunulması amaçlanmıştır.

2. İLGİLİ ÇALIŞMALAR(RELATED WORKS)

Bu bölümde, kullanıcıların sahip oldukları Android işletim sistemli mobil cihazları dolayısı ile karşılaştıkları güvenlik ihlalleri ve izin kullanımına yönelik kötüye kullanmaya dair daha önce yapılmış olan çalışmalar verilmiştir.

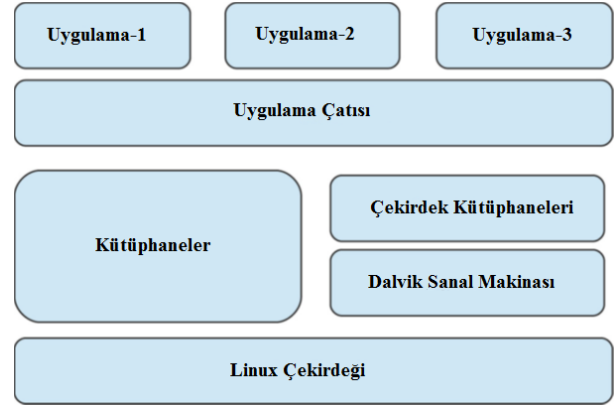
Dinamik analiz tabanlı olarak çalışmakta olan güvenlik çözümlerine ilişkin bazı çalışmalar şunlardır: Taint-Droid [10] android eklentilerinin, hassas verileri üçüncü parti uygulamalar üzerinden belli merkezlere ilettiğini ortaya koymuştur. Aynı şekilde AppsPlayground [12] kö-tücül fonksiyonların ve gizli bilgilerin sızdırılması teşeb-büslerinin tespit edilmesi için dinamik analiz altyapısını kullanan bir altyapı sunmaktadır. [13][14] Daha önce tanımlanmış politikalar ışığında kullanıcıların sahip olduk-ları verilerinin kontrol edilebileceği bir çalışma görüntü-leyici sunmuştur. [15] 2010 yılında Enck'in çalışmasını geliştirerek, daha ince detaylarda güvenlik politikalarının tanımlanıp, uygulamaların bu detaylı politikalar dahi-linde incelenebileceği bir çalışma yapmışlardır. MockDroid [16] kullanıcılara daha önce vermiş oldukları izinleri tekrar geri alabilme imkanı tanımaktadır.

Statik analiz güvenlik ve gizlilik çözümleri: [17][18] Di-namik analiz metodolojilerini tamamlayacak şekilde, statik analiz tabanlı olarak uygulamaların kullanıcı gizliliği açısından güvenli olup olmadığını tespit edebilecek ça-lışma yapmışlardır. AppProfiler [19] verilen uygulama-ların gizlilik seviyelerini belirlemek için kullanılabilir olacak olayların incelenmesine imkan tanıyan bir çalışmadır. ScanDroid [20] uygulamaların manifest dosyalarından istemiş oldukları izinleri çıkarmakta ve bunların hangile-rinin kullanıcı bilgilerinin sızdırılması için kullanılabil-ceğini değerlendirmektedir.

Yetki tabanlı çözümler: Kullanıcı verilerinin istek dışı hareketlerinin kontrol edilmesi ve engellemesi için kulla-nılan ve yukarıda verilmiş olan tekniklerin dışında, yetki tabanlı çözümlerde bulunmaktadır. [7][8] Uygulamaların statik analiz edilmesi ve uygulamanın gerek duyduğun-dan fazla izin talep edip etmediğinin tespit edilmesine yö-nelik çalışmadır. Her bir çözüm, izin haritasının çıkarıl-ması ile başlamakta ve bu haritanın analiz edilerek mey-dana gelmesi muhtemel güvenlik risklerinin ortaya çıkarıl-masını amaçlamaktadır. [21] Zincirleme olarak mey-dana gelebilecek tehditlerin tespit edilmesine imkan tanı-yan bir tarayıcı araç geliştirmişlerdir. Bu araç mobil ci-hazlara diğer uygulamalar gibi yüklenmektedir. Çalıştırılması durumunda, diğer uygulamaların manifest dosya-larını analiz etmek ve muhtemel zayıf yönlerini göster-mektedir. [5] benzer şekilde, uygulamaların manifest dosyasında istemiş oldukları izinleri istemekte ve bun-ların değerlendirmesini yapmaktadır. Uygulamaların talep ettiklerinden daha fazla izin istemeleri durumunda şüp-heli olabilecekleri değerlendirmesinde bulunmaktadır.

3. ANDROID İŞLETİM SİSTEMİ İZİN TABANLI GÜVENLİK MODELİ (ANDROID PERMISSION BASED SECURITY MODEL)

Android işletim sistemi Linux tabanlı bir model olması sebebiyle kişisel verilerin korunabilmesi, sistem kaynak-larına erişimin sınırlandırılması ve Java'dan kaynaklı problemlerin kolayca çözülmesine imkân tanımaktadır. Şekil-1'de "Android" işletim sisteminin yapısı genel hat-ları ile gösterilmiştir.



Şekil 1. Android Yazılımı Modüler Yapısı (Android Software Architecture) [5]

Android, her bir uygulamayı kendi kullanıcı yetkileri al-tında çalıştırır ve her birine eşsiz bir numara tanımlar. Bir kullanıcı altında birden fazla uygulama çalıştırmaya izin veren işletim sistemlerinden bu yönüyle ayrılır

Varsayılan olarak, uygulamalar, farklı bir kullanıcıyı veya uygulamayı etkileyecek şekilde koşuturulamazlar ve normal durumlarda kendilerine tahsis edilen sınırlı bir kaynak grubuna erişmeleri mümkündür. [22] Uygulama-lar tüm hassas operasyonları ile ilgili olarak manifest dos-yasında gerekli izinleri tanımlamalıdır. Böylece kulla-nıcılar uygulamaları mobil araçlarına kurarlarken bu izin-leri görürler ve onaylamaları halinde ilgili yazılım kuru-lumu gerçekleşmiş olur. Uygulamalar sadece manifest dosyasında tanımlanan izinlerin izin verdiği çerçevede kaynaklara erişebilirler. Bu şekilde, izin mekanizması sa-yesinde kullanıcılar için bir güvenlik katmanı oluşturul-muş olur. Örnek bir manifest dosyası Şekil-2 de gösteril-miştir.

```
<android.permission.CAMERA/>
<android.permission.WRITE_EXTERNAL_STORAGE/>
<android.permission.INTERNET/>
<android.permission.ACCESS_NETWORK_STATE />
<android.permission.READ_PHONE_STATE/>
<android.permission.READ_CONTACTS/>
<android.permission.VIBRATE/>
<android.permission.WRITE_CALENDAR/>
```

Şekil 2. Manifest Dosyası (Manifest File)[5]

Şekilde de gösterildiği gibi bir uygulama eğer mobil ara-cın kamera sistemine erişmek, bilgi alışı yapması istiyor ise, "android.permission.camera" şeklinde izin tale-bini manifest dosyasında deklare etmelidir. Böylece kul-lanıcılar da mobil araçlarına yükleyecekleri uygulamanın kamera sistemine erişeceğini görebilecektir. Eğer kulla-nıcı bunu kendisi için riskli bir durum olarak görüyor ise de uygulamayı reddederek güvenliği tehdit edici bu uy-gulamadan kurtulmuş olabilecektir. Eğer uygulamalar gerek duydukları izinleri talep etmeden, bu sistemlere erişmek isterlerse, bu durumda Android işletim sistemi tarafından güvenlik olağandışılığı firlatılır ve uygulama-nın çalışması sonlandırılır.

Mobil uygulamalar, konum bilgisinden çağrı geçmişine, mesajlardan maillere kadar birçok kişisel veriyi yönetmektedirler. Bu bilgiler kişilerin profilinin çıkarılması açısından kıymetli girdilerdir. Sadece kötücül uygulamalar değil, aynı zamanda zararsız uygulamalar da bu bilgilere erişmeyi istemektedirler. Örneğin Twitter uygulaması, kişilerin izni olmadan kullanıcı bilgilerini almaktadır. Uygulamalar bu bilgileri sadece almakla kalmayıp silme ve değiştirme gibi işlemler de yürütebilmektedirler. Kişisel veriler üzerinde manipülasyon işlemlerine ilişkin olarak detaylı analizlere [18][23] kaynaklarından erişilebilir.

Kötücül uygulamalar, oldukça kıymetli olan kişisel verilere erişmek için her zaman kendi izinlerini kullanmazlar. Bazı durumlarda, zararsız olan uygulamaların sahip oldukları izinleri kullanarak da bu bilgilere erişim izni elde edebilirler [24]. Böylece kullanıcı izin vermeseyse bile kişisel bilgilerine ulaşılabilir. Bu gibi durumlar gözetildiğinde, uygulamaların ihtiyaç duyduklarından daha fazla izin talep ettikleri durumlarda, eğer kullanıcılar bu durumu onaylarlar ise uygulamalar rahatlıkla kötücül bir moda geçebilirler. Bu işlemleri gerçekleştirmek için uygulamalar genelde güncelleme yöntemini kullanırlar [21]. Fazladan talep ettikleri izinler başlangıçta herhangi bir şekilde kullanılmaz iken, bir uygulama güncellemesi sonrasında, aktif olarak kullanılır hale gelebilir. Bu durumda uygulamalar kullanıcılar için riskli bir durum oluşmasına neden olurlar.

Mobil kötücül yazılımlar bu şekilde farklı yöntemler izleyerek, mobil kötücül yazılım tespit araçlarını atlatmak ve kötücül aktivitelerini hedef mobil araçlar üzerinde göstermek istemektedirler. Bu yazılımlara ilişkin üretilen güvenlik mekanizmaları da, Android'in temel felsefesini ve çalışma yapısını kullanmaktadır. Android işletim sisteminde izni önceden alınmamış hiç bir aktivite koşturamaz [5]. Aynı zamanda, kötücül uygulama yapıları doğrudan kullanıcıdan izin isteyerek uygulama katmanı seviyesinde çalışmak yerine, bu izni almadan bir şekilde sistem kaynaklarına erişmek için farklı yöntemleri kullanabilmektedirler. Sonuçta kötücül aktiviteler bu şekilde sistemsel veya kullanıcı davranış zayıflıklarını kullanarak faaliyetlerini yerine getirmektedirler. Bu durumda, en az izin en iyidir prensibi doğru bir güvenlik kurgusu yaklaşımı olacaktır. Yapılacak çalışmada bu yaklaşım temelinde, gerektiğinden fazla izin talep eden uygulamalar özel olarak incelenecek ve güvenlik konusunda zaafları olabileceği ön yargısı ile uygulamalar güvenlik tespit yapısına tabi tutulacaklardır [5].

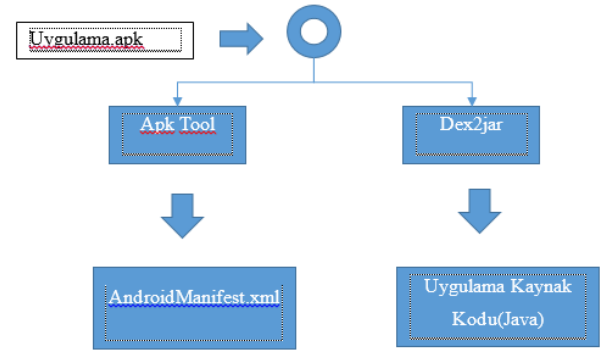
4. ANDROID GÜVENLİK YAKLAŞIMI VE TEORİK ALTYAPI (ANDROID SECURITY APPROACH AND THEORETICAL FRAMEWORK)

Bu çalışmada mobil uygulamaların profillerinin çıkarılması ve analiz edilmesi için verimli ve hızlı bir model ortaya koymaya çalışılmıştır. Bunun için uygulamaların talep etmiş oldukları izinler değerlendirilmiştir. Metodolojinin temelinde uygulamaların paketlerinin açılması,

izinlerinin ve kaynak kodlarının elde edilerek, uygulamaların davranışlarının tahmin edilmesi prensibi yatmaktadır. Buna göre uygulamaların bir şekilde paketlerinin açılması ve izin dosyası ile kaynak kod dosyalarının elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için statik analiz kullanılarak ilgili dosyalara erişim sağlanmış, karşılaştırma işlemleri yapılarak izinlerin kullanıma durumları belirlenmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda da, uygulamanın gerçekten fazladan izin talebinde bulunup bulunmadığı ve bunun ne seviyede gerçekleştiği değerlendirilerek, kötücül yazılım tespit edilmeye çalışılmıştır.

4.1. Paketlerin Açılması ve Analiz (Application Analysis And Repackaging)

Android mobil uygulamalarından doğrudan Java byte kod yerine Dalvik byte kodunu elde etmek amaçlanmaktadır. Java tabanlı uygulamalar üzerinde, Jad (Jad Java Derleyicisi), ASM gibi araçlarla kolay bir şekilde tersine mühendislik gerçekleştirilebilir. Benzer şekilde Apktool aracı ile de mobil uygulamalar analiz edilebilir ve üzerinde değişiklikler gerçekleştirilebilir. Dexpler [25], Dex2jar, Androguard gibi uygulamalar da benzer şekilde kullanılabilirler. Tersine mühendislik aşamasında her bir aracın kabiliyeti uygulamadan uygulamaya değişebilmektedir. Yapılan çalışmada uygulamanın izin dosyasına sağlıklı bir şekilde erişebilmek için Apktool aracı tercih edilmiştir. Bu şekilde düzgün okunup, ayrıştırılabilir manifest dosyası elde edilebilmiştir. Uygulamanın kaynak koduna erişmek içinse, Dex2jar aracı tercih edilmiştir. Böylece basit bir işlemle uygulamanın "classes.dex" dosyası kullanılarak kaynak koda erişim sağlanmıştır. Bu işlemlere ilişkin yapı Şekil-3'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Uygulama Tersine Mühendislik Diyagramı (Application Reverse Engineering Diagram)

Buna göre, uygulama ApkTool ve Dex2jar aracına verilir, sonucunda elde edilen değerler incelenmek üzere hazırlanmış olan Java uygulamasında işlenir.


4.2. Teorik Yaklaşım (Theoretical Approach)





Uygulamaların risk tespitlerinin yapılp değerlendirilebilmeleri için öncelikle Android işletim sistemi için kaç adet izin tipinin olduğunun belirlenmesi gereklidir. Bunun için Android resmi sitesinden toplam kaç farklı izin olduğu belirlenmiştir. Şekil-4'te bir kısmı gösterildiği gibi toplam 135 farklı izin tipi bulunmaktadır.

İzin ID	İzin ismi	İzin Tipi
1	ACCESS_CHECKIN_PROPERTIES	String
2	ACCESS_COARSE_LOCATION	String
3	ACCESS_FINE_LOCATION	String
4	ACCESS_LOCATION_EXTRA_COMMANDS	String
5	ACCESS_NETWORK_STATE	String
6	ACCESS_NOTIFICATION_POLICY	String
7	ACCESS_WIFI_STATE	String
8	ACCOUNT_MANAGER	String
9	ADD_VOICEMAIL	String
10	BATTERY_STATS	String
11	BIND_ACCESSIBILITY_SERVICE	String
12	BIND_APPWIDGET	String
13	BIND_CARRIER_MESSAGING_SERVICE	String
14	BIND_CARRIER_SERVICES	String
15	BIND_CHOOSER_TARGET_SERVICE	String
16	BIND_DEVICE_ADMIN	String
17	BIND_DREAM_SERVICE	String
18	BIND_INCALL_SERVICE	String
19	BIND_INPUT_METHOD	String
20	BIND_MIDI_DEVICE_SERVICE	String
TOPLAM 135 ADET İZİN BULUNMAKTADIR.		

Şekil 4. Android İşletim Sistemi İzin Listesi(Android Permission List)[18]

Şekil 4’te verilen izinler ışığında tüm uygulama kaynak kodu ve manifest dosyası taranarak bulunması halinde 1 bulunmaması halinde 0 olacak şekilde 1x135’lik bir uygulama matrisi elde edilmektedir. Bu matris hem manifest hem de kaynak kod için ayrı ayrı hesaplanmaktadır. Bu hesaplama işlemi tamamlandıktan sonra da veri tabanında her bir uygulama bir satıra denk gelecek şekilde Çizelge üzerine kaydedilmektedir. Şekil-5’te veri tabanı mimarisinin izin kayıt Çizelgesi gösterilmiştir.

 application

 applicationID: INTEGER
 packageName: VARCHAR
 permissionsFromManifest: VARCHAR
 permissionsFromUsage: VARCHAR

Şekil 5. Veri Tabanı Uygulama Kayıt Çizelgesi(Database Application Registry Table)

Şekil-5’te gösterildiği gibi, 1x135’lik matris bir metin haline getirilerek veri tabanına kaydedilir. Böylece daha sonra yapılacak genel değerlendirmede her bir uygulama sırası ile “applicationID”leri yardımıyla bu Çizelgedan çekilerek kullanılabilir. Bu yapıda kötüçül ve zararsız uygulamalar için aynı Çizelgedan iki adet oluşturulması mantığı tercih edilmiştir. Böylece kötüçül ve zararsız uygulamalar şeklinde 2 ayrı veri seti elde edilmiş olacaktır.

4.3. Risk Tespiti ve Değerlendirme (Risk Identification and Evaluation)

Uygulamalar ortaya konulan teorik yaklaşıma göre elde edilen veriler ışığında bir değerlendirmeye tabi tutulurlar. Bu yaklaşıma göre; manifest dosyasında uygulamaların talep etmiş oldukları izinler(M) ve bunların toplam sayısı(MP), Java kaynak kodunda sistem çağrısı yaptıkları izinler(U) ile izinlerin toplam sayısı(UP) olarak tanımlanacak olursa, aşağıda verilmiş olan Java kodu kullanılarak değerlendirilirler

```
for (int j = 0; j < MP.length; j++) {
    if (MP[j].equals("0") && UP[j].equals("1")) {
        warncount++;
    } else if ((MP[j].equals("1") && UP[j].equals("0"))) {
        suspiciouscount++;
        List<MyArray> liste = new ArrayList<>();
        liste = showUsagePermissions();
        String retrieve = net.getPermissionNameGivenID(j);
        for (int n = 0; n < liste.size(); n++) {
            String listename = liste.get(n).getName();
            if (retrieve.equals(listename)) {
                suspiciousvalue += liste.get(n).count;
            }
        }
    } else {
        normalcount++;
    }
}
```

Şekil 6. İzin Tabanlı Kötüçül Yazılım Değerlendirme Java Kodu(Permission Based Malware Evaluation Java Code)

Şekil 6’da verilmiş olan bir kısım Java kodunun da yaptığı gibi uygulamanın manifest dosyasında talep etmiş olduğu izinler ile bu izinlerden kaç tanesinin uygulama içerisinde kullanıldığı, fazla/eksik kullanımın söz konusu olup olmadığı belirlenmektedir. Bu değerlendirme için Şekil-6’da verilen Java kodu Çizelge-1’deki gibi bir değerlendirme yapmaktadır.

Çizelge 1. Değerlendirme Matrisi (Evaluation Matrix)

Mİ (Manifest Dosyası İzinleri)	Kİ (Kullanılan İzinler)	SONUÇ
1	1	NORMAL
0	0	NORMAL
1	0	ŞÜPHELİ
0	1	İKAZ

Bu Çizelgeye göre, Şekil-5’te verilmiş olan izinler uygulama manifest dosyasında aranarak, bulunması halinde 1, bulunmaması halinde 0 olacak şekilde değerlendirilerek

veri tabanına kaydedilir. Sonrasında uygulamanın bu izinleri kullanıp kullanmadığı tek tek kontrol edilmektedir. Bunun için de kendi kendini çağıran bir fonksiyon yardımıyla uygulamanın var olan tüm izin yapısı çıkarılmaktadır. Sonrasında metin arama metodu kullanılarak bu izni Java kaynak kodunun herhangi bir yerinde çağırıp çağırmadığı belirlenmektedir. Buna göre 0 veya 1 olacak şekilde değerlendirilmesi yapılmaktadır. Çizelge-1'deki matrisle göre bu iki değer karşılaştırılarak her bir uygulama için şüpheli değer sayısı ortaya çıkarılmaktadır. Bu değer bir uygulamanın kötüçül olup olmadığını değerlendirmemiz için kritik bir sonuçtur.

Bu değerlendirmeler sonucunda elde edilen şüpheli durumların sayısı bir uygulamanın çalışması için gerekli izinden fazlasını talep ettiği ve onun bir kötüçül yazılım olabileceği riskinin bulunduğu gösterir. Ancak bazı kötüçül karakteristiğe sahip olmadığı düşünülebilecek uygulamalar için de benzer durumlarla karşılaşmaktadır. Bunun uygulama geliştiricilerin hatalarından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Bunun gibi hatalı durumları ortadan kaldırıp daha doğru kötüçül yazılım tespiti yapmak için bu yöntemle bir çarpan değeri eklenmiştir. Bu çarpan değeri Şekil-6'da örnek olarak gösterildiği gibi bir iznin kötüçül veri seti içerisinde kullanılma sayısından elde edilmiştir. Gerçekte fazladan/gereksiz yere talep edilen bu izinlerin kötüçül yazılımlar içerisinde kullanılma frekansı dikkate alınmaktadır. Yaklaşımına göre, bir uygulamanın fazladan talep etmiş olduğu izin kötüçül uygulamalar arasında yoğunlukla kullanılan bir izin ise bu durum o uygulamanın gerçekten kötüçül olma riskini artıran bir unsur olmaktadır.

Çizelge 2. Frekans Çizelgesi(Frequency Table)

İstenilen izinler	Kullanılma Sayısı
INTERNET	49
READ_PHONE_STATE	46
WRITE_EXTERNAL_STORAGE	41
ACCESS_NETWORK_STATE	38
ACCESS_WIFI_STATE	36

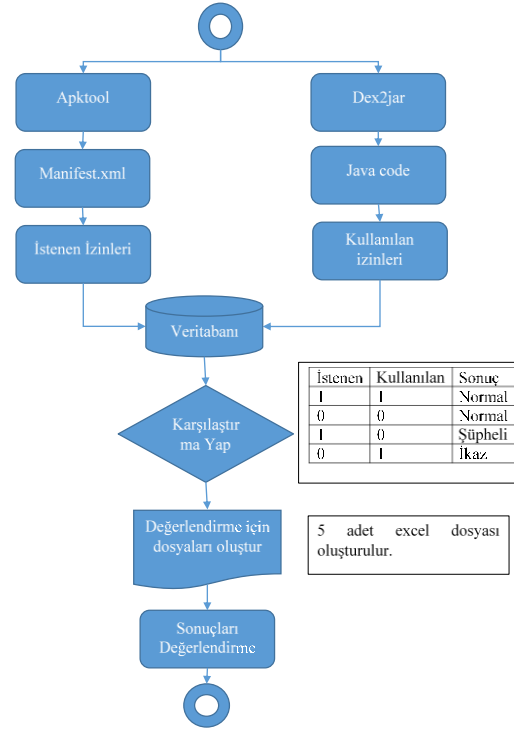
Çizelge-2'de örnek olarak verildiği gibi kötüçül uygulamalar için "INTERNET" iznin kullanım frekansı oldukça yüksektir. Eğer bir uygulama bu izni isteyip, kullanmamış ise oldukça riskli bir gruba girmiş olacaktır. Aşağıda verilen formüle göre bu değerlendirme yapılarak her bir uygulama için şüpheli değeri elde edilmektedir.

$$\text{Şüpheli Değeri} = \sum_{i=1}^n \text{ŞüpheliFrekans}_i, n = \text{şüpheli izin sayısı} \quad (1)$$

Her bir uygulama için şüpheli izin sayısına göre (1) numaralı yaklaşım doğrultusunda şüpheli değeri hesaplanmaktadır. Bu hesaplama sonucunda oluşan şüpheli değeri eğer zararsız uygulama veri seti şüpheli değeri ortalama-

sından yüksek ise o uygulama kötüçül riskli olarak belirlenmektedir. Bu şekilde uygulamaların kötüçül olup olmadıkları belirlenebilmektedir.

Ortaya konulmuş olan metodolojik yaklaşımın genel akış diyagramı Şekil-7'de gösterildiği gibidir



Şekil 7. Akış Diyagramı (Flow Chart)

Bu diyagrama özetlenecek olursa; öncelikle uygulama için Dex2jar ve Apktool araçları ile tersine mühendislik işlemi gerçekleştirilir. Sonrasında "Manifest" ve "Java Kaynak Kod" elde edilir. Bu iki elde edilen paket hazırlanan yazılım sayesinde ayrıştırılarak, 135 adet izin ışığında veri tabanına kaydedilirler. Bu kayıt sonrasında, uygulamanın istemiş olduğu ve kullandığı izinler şekilde verilen Çizelge ışığında karşılaştırılır ve sonuçta şüpheli görülen izinler listesi çıkarılır. Bu çıkarılan liste ile frekans değeri çarpımı sonucunda elde edilen değer incelemek üzere ayrıca Excel dosyalarına aktarılır ve sonuçlar değerlendirilir. Bu değerlendirme sonucunda, zararsız uygulamalar için belirlenmiş olan ortalamaların üzerinde şüpheli değerine sahip uygulamalar kötüçül olarak belirlenir. Tüm bu işlemler hazırlanan Java tabanlı yazılım sayesinde gerçekleştirilmektedir.

5. UYGULAMA (Application Details)

Çalışmanın dördüncü bölümünde teorik altyapısından bahsedilmiştir. Bu altyapı doğrultusunda aşağıda verilen kabuller ve veri setleri ışığında uygulama hazırlanmış ve sonuçları elde edilmiştir. Buna göre;

Değerlendirme Ölçütleri:

- 1- Uygulamaların değerlendirilmesi için Android işletim sistemi resmi web sitesinde paylaşılan 135 adet farklı izin referans izin listesi olarak alınmıştır.
- 2- Yeni uygulamaların değerlendirilmesi için 50 adet kötücül ve 25 adet zararsız uygulama seçilmiştir.
- 3- Kötücül uygulamalar Drebin veri setinden [26], Zararsız uygulamalar ise sadece banka mobil uygulamaları arasından seçilmiştir.
- 4- Uygulamaların Java kaynak kodlarını elde etmek için Dex2jar programı tercih edilmiştir.
- 5- Uygulamaların “AndroidManifest.xml” dosyalarını elde etmek için Apktool programı tercih edilmiştir.
- 6- Tüm bu işlemleri gerçekleştirmek üzere Java programlama dili ve Mysql veritabanı yönetim sistemi Apache ile birlikte kullanılmıştır.

Bu değerlendirme ölçütleri ışığında elde edilen sonuçlar Çizelge-3’te sunulduğu gibidir.

ortaya çıkmaktadır. Örneğin uygulamaların “INTERNET” izni talep etme sayısı 49 iken, bu iznin kullanılma oranı 23’tür. Bu bariz fark bu iznin birçok uygulama tarafından talep edilmekte ancak kullanılmamakta olduğunu göstermektedir. Kötücül uygulamaların aslında “INTERNET” iznini talep etmekte ve kullanmakta hevesli oldukları ancak bunların büyük bir kısmının da bu izni daha sonra kullanmak üzere istedikleri ancak kullanmadıkları gözlemlenmiştir. Bu durum kötücül uygulamalar açısından, oldukça şüphe uyandırıcı bir mesaj vermektedir.

Benzer şekilde, 25 adet zararsız veri setinin incelenmesi sonucu elde edilen izin kullanılma listesi Çizelge-4’te gösterilmiştir. Çizelge incelendiğinde, bazı izinler için istenme ve kullanılma durumları açısından farklar olduğu gözlemlenmiş olsa da bu farklar sadece bir kaç izin için oldukça azdır. Bu durumda da, bu karşılaştırma sonucunda elde edilecek fark değerleri hem kötücül uygulama veri setleri için hem de zararsız veri setleri için kullanılma

Çizelge 3. Uygulama Sonucu Elde Edilen Frekans Değerleri (Kötücül Veri seti) (Frequency Values Obtained After Application(Malware Data Set))

Uygulama Manifest Dosyası İzin Talep Frekansı		Uygulama Kaynak Kodu İzin Talep Frekansı	
İstenilen izinler	Kullanılma Sayısı	Kullanılan İzinler	Kullanılma Sayısı
INTERNET	49	ACCESS_FINE_LOCATION	27
READ_PHONE_STATE	46	ACCESS_COARSE_LOCATION	26
WRITE_EXTERNAL_STORAGE	41	INTERNET	23
ACCESS_NETWORK_STATE	38	VIBRATE	19
ACCESS_WIFI_STATE	36	ACCESS_NETWORK_STATE	18
WAKE_LOCK	29	INSTALL_SHORTCUT	16
ACCESS_COARSE_LOCATION	26	READ_PHONE_STATE	15
ACCESS_FINE_LOCATION	25	CAMERA	13
RECEIVE_BOOT_COMPLETED	22	DUMP	12
INSTALL_SHORTCUT	18	WRITE_EXTERNAL_STORAGE	10
VIBRATE	18	GET_ACCOUNTS	9
SEND_SMS	17	UNINSTALL_SHORTCUT	8
UNINSTALL_SHORTCUT	13	READ_CONTACTS	8
GET_ACCOUNTS	12	ACCESS_WIFI_STATE	8
READ_SMS	12	CALL_PHONE	6
READ_CONTACTS	10	SEND_SMS	5
TOPLAM(135 ADET)		TOPLAM(135 ADET)	

Çizelge-3’te, incelenen 50 adet kötücül olduğu varsayılan uygulama için elde edilen izin frekans değerleri gösterilmektedir. Çizelge incelendiğinde, aslında uygulamanın teorisinde anlatılan tüm durumlar sayısal değer olarak

bilir bir şüphe değeri elde etmemize imkân tanımaktadır. Ortaya çıkan bu izin kullanım farkları sonucunda incelenen 50 adet kötücül uygulama için, elde edilen sonuçlar Çizelgesunun bir bölümü Çizelge-5’te verilmiştir

- **Şüpheli İzinler:** Uygulamada istenilip kaynak kodda kullanılmayan izinlerin toplam sayısıdır.

Çizelge 4. Uygulama Sonucu Elde Edilen Frekans Değerleri (Zararsız Yazılım Veri seti) (Frequency Values Obtained After Application(Benign Data Set))

Uygulama Manifest Dosyası İzin Talep Frekansı		Uygulama Kaynak Kodu İzin Talep Frekansı	
İstenilen izinler	Kullanılma Sayısı	Kullanılan İzinler	Kullanılma Sayısı
INTERNET	24	INTERNET	15
ACCESS_NETWORK_STATE	20	WAKE_LOCK	15
ACCESS_FINE_LOCATION	17	NFC	14
WRITE_EXTERNAL_STORAGE	16	VIBRATE	11
ACCESS_COARSE_LOCATION	15	BLUETOOTH	10
WAKE_LOCK	12	READ_PHONE_STATE	9
READ_PHONE_STATE	11	WRITE_EXTERNAL_STORAGE	9
GET_ACCOUNTS	10	ACCESS_NETWORK_STATE	8
ACCESS_WIFI_STATE	10	ACCESS_WIFI_STATE	7
READ_CONTACTS	10	CAMERA	6
VIBRATE	9	GET_ACCOUNTS	6
CALL_PHONE	9	ACCESS_COARSE_LOCATION	4
CAMERA	9	DUMP	4
RECEIVE_SMS	8	SEND_SMS	4
TOPLAM(135 ADET)		TOPLAM(135 ADET)	

Çizelge 4. 10 Adet Kötücül Uygulama İçin İzinleri Gösterir Durum Çizelgesi(Status Table Showing Permissions for 10 Malware Application)

ID	İstenilen İzinler	Kullanılan izinler	Normal izinler	Şüpheli izinler	İkaz
1	2	0	133	2	0
2	12	5	126	8	1
3	11	0	124	11	0
4	11	4	124	9	2
5	10	0	125	10	0
6	10	5	126	7	2
7	14	13	126	5	4
8	5	13	123	2	10
9	12	7	130	5	0
10	8	7	124	6	5
TOPLAM UYGULAMA SAYISI KADAR SONUÇ BULUNMAKTADIR.					

İstenen İzinler: Uygulamanın manifest dosyasında istenmiş olduğu izinlerin toplam sayısıdır.

- **Kullanılan İzinler:** Uygulamanın kaynak kodunda çağrı yaptığı izinlerin toplam sayısıdır.
- **Normal İzinler:** Manifest ve kaynak kodda isteyip kullanıldığı veya istemeyip kullanmadığı izinlerin toplam sayısıdır.

- **İkaz:** Manifest dosyasında istenilmeyip, kaynak kodda çağrı yapılan izinler toplamıdır.

Çizelge-5 incelendiğinde, her bir uygulama için 5 farklı izin sınıflandırması yapıldığı görülmektedir. Bu karşılaştırma Çizelge-1'de verilen sistematige göre yapılmaktadır. Bu değerlendirme sonucunda her bir uygulamanın şüpheli izin sayıları çıkarılmaktadır. 10 adet uygulama

için sunulan listede görüleceği üzere şüpheli izni hiç olmayan bir uygulama yoktur. Her bir uygulamanın belirlenen risk

matrisine göre hesaplanacak bir şüphe değeri olacaktır. Bu gözlem sonucunda, uygulamalar için bir risk değeri(şüphe değeri) hesaplanarak sınıflandırma yapılabileceği düşünülmüştür. Aynı şekilde zararsız uygulamalar için Çizelge-6'da sunulan örnek gösterge Çizelgesunda,

şüpheli izin sayısı 0 olan birçok uygulama olduğu ve birçoğunun da oldukça düşük sayıda şüpheli izne sahip oldukları görülecektir. Bu genel durum dahi bize bu noktada kötücül ve zararsız uygulamalar arasında bu noktada ciddi farklar olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5. 10 Adet Zararsız Uygulama İçin İzinleri Gösterir Durum Çizelgesi(Status Table Showing Permissions for 10 Benign Application)

ID	İstenilen İzinler	Kullanılan izinler	Normal izinler	Şüpheli izinler	İkaz
1	1	0	134	1	0
2	0	0	135	0	0
3	10	9	124	6	5
4	2	0	133	2	0
5	2	1	132	2	1
6	12	9	124	7	4
7	1	0	134	1	0
8	11	29	113	2	20
9	5	4	130	3	2

Çizelge 6. Kötücül Uygulamalar için Şüphe Değeri Çizelgesi(Suspicious Value Table for Malware Applications)

ID	İstenilen İzinler	Kullanılan izinler	Normal izinler	Şüpheli izinler	İkaz	Şüphe Değeri	Ortalama
1	2	0	133	2	0	16	
2	12	5	126	8	1	49	
3	11	0	124	11	0	78	
4	11	4	124	9	2	21	
5	10	0	125	10	0	41	
6	10	5	126	7	2	38	
7	14	13	126	5	4	48	
8	5	13	123	2	10	2	
9	12	7	130	5	0	3	
10	8	7	124	6	5	38	
11	15	7	127	8	0	54	
12	13	2	124	11	0	33	
13	11	0	124	11	0	78	
14	11	8	126	6	3	38	
15	6	2	131	4	0	2	
16	8	7	132	2	1	0	
17	5	0	130	5	0	21	
18	13	0	122	13	0	40	
19	17	10	122	10	3	55	
20	7	9	123	5	7	2	

Çizelge 7. Kötücül Uygulamalar için Şüpheli Değeri Çizelgesi(Suspicious Value Table for Malware Applications) (Devamı)

ID	İstenilen İzinler	Kullanılan İzinler	Normal İzinler	Şüpheli İzinler	İkaz	Şüpheli Değeri	Ortalama
21	11	1	125	10	0	62	
22	9	7	131	3	1	34	
23	6	3	128	5	2	21	
24	8	4	131	4	0	16	
25	13	7	125	8	2	67	
25-50							
Ortalama Değer						1654	33.03

Böylece uygulamalar ile ilgili genel bir değerlendirme Çizelgesi oluşturulmuştur. Çizelgeler değerlendirilerek (1) numaralı formül ışığında her bir uygulama için, kötü-cül ve zararsız uygulamalar için ayrı ayrı olarak, aşağıda

verilmiş olan Çizelge-7 ve Çizelge-8 elde edilmiştir. Buna göre Çizelge-5 ve Çizelge-6'dan farklı olarak şüpheli değeri her bir uygulama için hesaplanmıştır.

Çizelge 8. Zararsız Uygulamalar için Şüpheli Değeri Çizelgesi(Suspicious Value Table for Benign Applications)

ID	İstenilen İzinler	Kullanılan İzinler	Normal İzinler	Şüpheli İzinler	İkaz	Şüpheli Değeri	Ortalama
1	14	9	124	8	3	9	
2	0	0	135	0	0	0	
3	10	9	124	6	5	5	
4	2	0	133	2	0	2	
5	2	1	132	2	1	0	
6	12	9	124	7	4	11	
7	14	9	124	8	3	9	
8	14	8	123	9	3	7	
9	13	10	124	7	4	7	
10	12	7	126	7	2	5	
11	11	10	120	8	7	17	
12	4	0	131	4	0	4	
13	11	0	124	11	0	23	
14	28	26	109	14	12	9	
15	11	29	113	2	20	1	
16	5	4	130	3	2	1	
17	9	17	127	0	8	0	
18	14	5	124	10	1	11	
19	8	5	128	5	2	6	
20	1	0	134	1	0	0	
21	6	0	129	6	0	4	
22	11	6	126	7	2	21	
23	1	0	134	1	0	0	
24	5	5	125	5	5	7	
Ortalama Değer						159	6.26

Çizelge-7 ve Çizelge-8 bu bölümde anlatılan tüm teorik altyapının ve modelin var olan kötücül ve zararsız uygulama veri setlerine uygulanması sonucu elde edilen değerlerdir. Çizelgede yeşil olarak işaretlenmiş olan hücreler, yüksek şüphe değerine sahip uygulamaları göstermektedir. Genel bir bakış ile kötücül Çizelgesundaki yeşil hücrelerin çokluğu ve aksi yönde zararsız uygulama Çizelgesundaki yeşil hücre sayısının azlığı kolayca gözlemlenebilecektir.

Ayrıca Şekil-8’de görüleceği üzere sonuçlar detaylı olarak incelendiğinde, 50 adet kötücül uygulama için toplam 1654 şüphe değeri ve ortalama 33.08 gibi bir ortalama şüphe değeri elde edilir iken, 25 adet zararsız uygulama için 159 toplam şüphe değeri ve ortalama 6.26 şüphe değeri elde edilmektedir.

Kötücül veri seti için ortalama olarak 33.08 ve zararsız veri seti için elde edilen 6.26’lık ortalama şüphe değeri arasında ciddi bir fark olduğu görülmektedir. Bu bize aslında (1) numaralı formüle göre elde edilecek şüphe değerinin, uygulamaların kötücül olup olmadığının tespit edilmesi noktasında iyi bir fikir vereceğini göstermektedir.

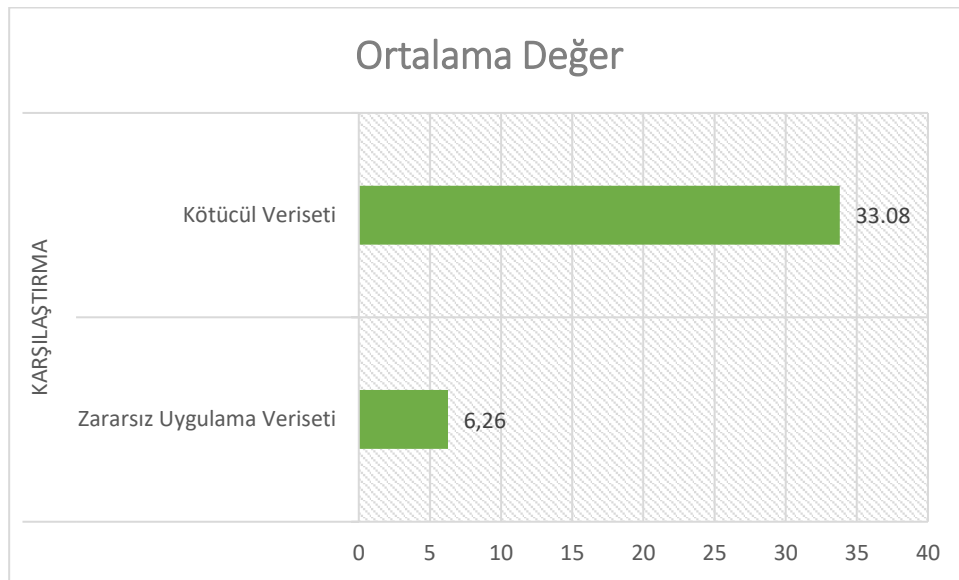
6. TARTIŞMA(DISCUSSION)

Bu çalışmada önerilmiş olan modelin kendi içerisinde tutarlı sonuçlar ürettiği, kötücül uygulamalar ile zararsız uygulamalar için elde edilen şüphe değeri yaklaşımının belli bir seviyede ayırt edici değerler elde etmemize yardımcı olduğu beşinci bölümde anlatılmıştır.

Bu bölümde Android 6.0 Marshmallow ile birlikte gelen yeni izin mekanizması karşısında modelin nasıl davranışlar sergileyeceği incelenecektir. Ayrıca, ikinci bölümde verilmiş olan bu konudaki benzer çalışmalar ile geliştirilmiş olan modelin performans değerlerinin karşılaştırılması yapılacaktır.

6.1. Android 6.0 Marshmallow ile Geliştirilen Modelin Karşılaştırılması (Comparison Between Android 6.0 Marshmallow and Developed Model)

Android işletim sisteminin son jenerasyon ürünü olan 6.0 (API Level 23) Marshmallow olarak adlandırılmıştır. Bu yeni ürün Kasım 2015 gibi çıkmış ve bir dizi güncelleme bugüne kadar yayınlamıştır [27]. Bu version “material design” olarak adlandırılan yeni sistemin ayak seslerini duyurmaktadır. Bu sisteme göre Android klasik temasın-



Şekil 8. Şüphe Değeri Karşılaştırması(Suspicious Value Comparison)

Uygulama markete veya 3.parti bir uygulama paylaşım organizasyonuna her yeni yüklenen uygulamanın şüphe değerinin belirlenmesi ve bunun kullanıcılar ile paylaşılması, uygulamayı yüklemeyi planlayan kullanıcılar açısından bir fikir verebilecektir. Hatta bazı durumlarda çok yüksek şüphe değerleri elde edilmesi halinde, uygulamalar markete yüklenmeden ciddi bir şekilde sorgulanması yapılabilecektir.

Bu sonuç göstermektedir ki, elde edilen metodoloji kendi içerisinde kötücül ve zararsız uygulamalar için yol gösterici sonuçlar üretmektedir ve kendi içinde tutarlı bir yapıdır. Diğer taraftan, uygulamanın statik analiz kullanılarak kötücül yazılım tespiti yapan araçlar ile karşılaştırılması çalışmanın altıncı bölümünde ayrıca değerlendirilmiştir.

dan vazgeçerek, her bir uygulama için kendine özgü bir dünya hazırlamaya imkân tanıyarak, uygulamalar arasındaki geçişte yepyeni bir düzen ve şema ile karşılaşılması sağlamaktadır [27]. Bu yeni işletim sisteminde başta yukarıda verilmiş olan “material design” yapısı olmak üzere, bu makalede bahsedilen izin mekanizmasına ilişkin bazı değişikliklere gidilmiştir. 6.0 öncesi versiyonlarda, kullanıcıların doğrudan Android resmi marketinden veya üçüncü parti web servisleri üzerinden uygulama yüklemek istediklerinde, uygulamaların kurulması esnasında talep ettikleri tüm izinler kabul etmemeleri halinde hiç bir şekilde bu uygulamaları kullanabilmeleri mümkün olamamaktaydı. Kullanıcıların, geliştirilen bu

yeni izin mekanizması sayesinde izinleri kurulum sonrası, uygulamaları kullanmaları esnasında kabul/ret edebilmeleri mümkün olabilmektedir. Kullanıcıların güvenlikle ilgili farkındalıklarını geliştirecek bir mekanizma kurulmuştur [27].

Bu çalışmada geliştirilmiş olan model statik analiz tabanlı olarak kod analizi yapan bir yapıda çalışmaktadır. Statik analiz metodu kullanıcıların sahip oldukları uygulamaları çalışmaları esnasında analiz etmek yerine doğrudan geliştirilmiş olan kod üzerinden analiz yapmaktadır

6.2. Bu Konudaki Benzer Çalışmalar ile Performans Değerleri Karşılaştırması (Compare Performance Values with Similar Studies)

Android kötücül yazılım tespit araçlarına ilişkin olarak statik analiz metodolojisini kullanan birçok yöntem bulunmaktadır ve bu konudaki detaylı çalışmalar ikinci bölümde verilmiştir. Bu bölümde geliştirilmiş olan android kötücül yazılım tespit aracı ile literatürde bulunan kötücül yazılım tespit araçlarından statik analiz yöntemi kullananların özellikleri Çizelge-9'da verilmiştir

Çizelge 9. Android Kötücül Yazılım Araçları Karşılaştırması (Comparison Between Android Mobile Software Tools)

Referans No	Analiz Tekniği	Algoritma	Özellikler	Veriseti	Değerlendirme	Başarı Oranı(%)
[29]	Statik	1-NN	Kod Parça Grameri	Android Genom Project	Sınırlandırma Doğruluğu	94.26
[30]	Statik	Naive Bayes	İzinler, Kod Tabanlı Özellikler	Android Genom Project, 1000 zararlı uygulama	Hata oranı, doğruluk, Gerçek Negatif Oranı, Gerçek Pozitif Oranı, Yalancı Negatiflik Oranı, Yalancı Pozitiflik Oranı, Hassaslık	93
[31]	Statik	-	İzin Kombinasyonları	Android Genom Project, 741 zararlı uygulama	Tespit Oranı	88 zararsız, 96 kötücül
[32]	Statik	Karar Ağacı, Naive Bayes	API ile ilgili özellikler ve izinler	McAfee iç kaynaklar	Gerçek Negatif Oranı, Gerçek Pozitif Oranı, Yalancı Negatiflik Oranı, Yalancı Pozitiflik Oranı, Sınıflandırma Oranı	97
[33]	Statik	Naive Bayes	API çağrıları, ikili izinler ve linux komutları	Android Genom Project, 1000 zararlı uygulama	Gerçek Negatif Oranı, Gerçek Pozitif Oranı, Yalancı Negatiflik Oranı, Yalancı Pozitiflik Oranı, Sınıflandırma Oranı	92.1
[34]	Statik	Karar Ağacı	İstenilen ve Kullanılan izin çiftleri	AppChina, Android Genom Project	Gerçek Negatif Oranı, Gerçek Pozitif Oranı, Hassaslık, Sınıflandırma Doğruluğu	98.6
[4]	Statik	Birincil Parça Analizi, Destek Vektör Makineleri	İzinler	Android Genom Project, Android Resmi Marketi	Gerçek Pozitif Oranı, Sınırlandırma Doğruluğu	90
[35]	Statik	Destek Vektör Makineleri	İzinler	Contagio Mobil ve Anzhi Marketi	Sınırlandırma Doğruluğu	75.78 - 85.11
[36]	Statik	Grup Sınıflandırma	API çağrıları ve ikili izinler	Android Genom Project	Hassaslık, F-ölçüm	98.8
[37]	Statik	VF2 algoritması	Android, Özel parçalar	Android Genom Project	Tespit Oranı	86.36
[38]	Statik	Lojistik Regresyon	İzinler	Android Genom Project, Drebin	Doğruluk, Çeşitlilik	88 (doğruluk), 92.5 (çeşitlilik)

dır [28]. Bu sebeple, Android işletim sisteminin izin yönetim mekanizması ile doğrudan ilişkili değildir. Android 6.0 ile gelen bu yeni izin mekanizmasında kullanıcılar için daha güvenli olan bir izin kabul/ret yapısı kurulmuştur. Bu kurguda, izinlerin fazladan talep edilip edilmediği göz önünde bulundurulmamaktadır.

Yapılan bu çalışmada, aslolan uygulamanın isteyip kullanmadığı izinlerin sayısı ve frekansdır. Kullanıcıların bu izinleri onaylayıp onaylamadığından etkilenmemektedir. Yeni sistem içinde uygulama yüklendikten sonra kod analizini gerçekleştirip uygulamanın kötücül olup olmadığı belirlenecektir.

Çizelge-9 incelendiğinde, kötücül yazılım tespit araçlarının algoritma olarak Karar ağacı, Naive Bayes teoremleri ile Destek Vektör Makinelerini yaygın olarak kullandıkları görülmüştür. Özellik olarak genelde izin tabanlı olarak çalışmış ve izin çiftlerinin karşılaştırılması yoluna gidilmiştir. Geliştirilen araçların test edilmesinde yaygın olarak kullanılan Android Genom Project ve Drebin verisetleri tercih edilmiştir. Değerlendirme ölçütü kötücül yazılımlar için doğru şekilde tespit olarak belirlenmiştir. Ve sonuçta, bütün bu seçimler sonucunda geliştiren modellerin verisetleri üzerinde çalıştırılması sonucunda elde edilen doğruluk oranları belirlenmiştir. Genel olarak incelenecek olursa, iki tanesi haricinde tamamı sadece kötücül verisetlerinde çalıştırılmıştır. Kötücül verisetleri

için doğruluk oranı %98.8 ile %85.11 arasında değişmekle birlikte, zararsız yazılım veri setleri için %75.78 ile %88 oranları elde edilmiştir.

Çalışmanın, uygulama bölümünde 50 adet kötücül ve zararsız yazılım için test sonuçlarını gösterir sonuçlar sunulmuştur. Buna göre kötücül uygulamalardan oluşan veriseti için incelenen toplam 50 uygulama için %80'lik bir doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu oran, Çizelge-9'da sunulmuş olan uygulamalara göre düşük bir değer gibi görülebilmektedir. Ancak, geliştirilmiş olan model kötücül uygulamaların kullandıkları izin frekanslarını baz alarak sonuçlar ürettiği için uygulama sayısındaki artış ile birlikte modelin daha doğru sonuçlar elde etmesi kaçınılmazdır. Çünkü 50 adet uygulama için sonuçlar incelendiğinde, 5 adet kötücül uygulama için 0 şüphe değeri elde edilirken, 3 adet uygulama içinde 2 şüphe değeri elde edilmiştir ve bu sebeple geliştirilen modelin doğruluğunu düşüren uygulamalar olmuşlardır. Ancak 0 veya 0'a çok yakın çıkan değerler elenmesi gereken uygulamalardır [39]. Uygulama sayısının belli bir sayıyı aşması durumunda, aslında şüpheli izinlere sahip olmasına rağmen frekans değerlerinin 0 olması sebebiyle sonuçta 0 şüphe değerine sahip olmaları bu uygulamaların zararsız olduğunu göstermeyecektir. Bu uygulamaların elenmesi halinde de %97.62'lik bir doğruluk oranı elde edilmiş olacaktır. Bu da yaklaşık olarak Çizelgede verilmiş olan 11 adet uygulama arasında ilk sıralarda yer alacak kadar doğrulukta sonuçlar üreten bir model olduğunu gösterecektir. Diğer taraftan, zararsız uygulamalar üzerinde de test edilen iki adet araç için %75.78 ve %88'lik doğruluk oranları elde edilmiştir. Bu çalışmada geliştirilmiş olan model, %80'lik bir doğruluk oranı ile sonuçlar üretmiştir. Bu oran daha önceki çalışmalara göre ortalama bir sonuçtur.

Bu bölümde daha önceki çalışmaların verisetleri üzerinde test edilmesi sonucu elde edilen doğruluk oranları ile bu çalışmada geliştirilmiş olan modelin doğruluk oranları arasında bir kıyaslama yapılmıştır. Ancak bu kıyaslamamızın salt değerler üzerinden yapılması doğru bir yaklaşım da olmayacaktır. Çünkü bu araçların kullandığı verisetleri aşağı yukarı aynı olmakla birlikte, seçilen örnek uygulamaların sayısı 1000'ler seviyesindedir ve homojen bir dağılım gösterdiği söylenemez [5]. Bu sebeple, aynı uygulamalar üzerinde test edilmeyen araçların sonuçlarının değerlendirilmesi sağlıklı olmayacaktır. Ayrıca, kötücül verisetlerinin dağılımının sınırlı olması sebebiyle tüm araçlar aynı verisetleri üzerinde test edilmişlerdir. Ancak zararsız yazılımlar için böyle bir veriseti dağıtımı bulunmamaktadır. Bu sebeple araçların hangi zararsız olduğu düşünülen yazılımlar üzerinde test edileceği belli değildir. Dolayısı ile rastgele resmi marketlerden indirilen uygulamaların zararsız olarak kabul edilmesi ve test edilerek bunların araçların doğruluğu gösterir sonuçlar olarak alınması gerçekçi karşılaştırmalar yapılmasına engel bir durumdur.

Sonuçta, bazı problemler yanları olsa, kötücül ve zararsız yazılım verisetleri üzerinde yapılan testlerde diğer araçlara göre kötücül verisetlerinde en iyi araçlara yakın bir değer elde edilebilirken, zararsız yazılım verisetlerinde

ortalama doğrulukta sonuçlar üretilmiştir. Ancak, test edilen uygulama sayısının artışı ile birlikte daha doğru sonuçlar üretilebileceği düşünülmektedir.

7. SONUÇ (CONCLUSION)

Kullanıcılar arasında kullanılma oranı hızla artış gösteren Android işletim sistemi, yazılımcıların bu alana yönelmelerine neden olmaktadır. Bu yöneliş kullanıcılar açısından birçok faydalı uygulamanın marketlerde paylaşılmasını beraberinde getirmiştir. Kullanıcılar ihtiyaç duydukları birçok uygulamayı ücretsiz bir şekilde resmi veya 3.parti uygulama marketlerinden indirebilmektedirler. Bu şekilde ücretsiz olarak paylaşılan birçok uygulama beraberinde kötücül uygulamaların dağıtımını da getirmektedir. Böylece içerisinde kötücül ve zararsız uygulamaları barındıran bir dağıtım pratiği ortaya çıkmaktadır.

Uygulamaların "AndroidManifest.xml" dosyasında talep ettikleri izinler ile bunların bazıları kullanmadıkları izinler arasındaki fark gereksiz izinler olarak tanımlanabilir. Bu durumda, uygulamalar için kullanıcıların hassas ve kişisel verilere erişme de kullandıkları yeni bir kötücül yaklaşımı beraberinde getirmektedir. Kullanıcılar uygulama kurulurken, uygulamanın istedikleri izinlere güvenerek uygulamayı mobil araçlarına kurmaktadır. Ancak bu şekildeki gereksiz izinler barındıran uygulamalar, daha sonra gelebilecek güncelleme vb. şekildeki kod parçaları ile bu gereksiz izinler kullanılarak kötücül faaliyet yapabilmektedirler.

Bu çalışmada, bu kötücül ve zararsız yazılımların belirlenmesi için farklı bir statik tabanlı metodolojik yaklaşım ortaya konulmuştur. Bu metodolojinin temelinde, uygulamaların "AndroidManifest.xml" dosyalarında talep ettikleri izinler ile bunları ne ölçüde kaynak kodlarında kullandıklarına ilişkin bir değerlendirme yatmaktadır. Bu değerlendirme sonucunda, uygulamanın çalışması için gereksiz izin talebinde bulunulmuş ise, bu uygulamalar riskli kategoride değerlendirilerek, kendileri için bir şüphe değeri belirlenmektedir. Buna göre, ortalamanın üzerindeki değerlerine sahip uygulamalar kötücül uygulama olarak sınıflandırılmaktadır. İncelenen 50 Adet kötücül ve 25 adet zararsız uygulama için; Kötücül uygulamalarda %97.62'lik bir tespit oranı yakalanmıştır. Ancak aynı yaklaşım zararsız kabul edilen uygulamalar için yaklaşık %20'lik bir kötücül tespit oranı vermektedir. Bu da göstermektedir ki, ortaya konulan yeni yaklaşım tek başına yeterli değildir ve dinamik analiz yaklaşımı ile desteklenerek birlikte kullanılmalıdır. Böylece daha etkili ve doğru sonuçlar üretilebilecektir.

REFERANSLAR (REFERENCES)

- [1] Seo S., Gupta A., Sallam A.M., Bertino E., Yim K., "Detecting mobile malware threats to homeland security through static analysis", *Journal of Network and Computer Applications*, 38: 43-53, (2014).
- [2] Leavitt N., "Mobile phones: the next frontier for hackers?", *IEEE Xplore:Computer*, 38: 20-23, (2005).

- [3] Shih, D.H., Lin, B., Chiang, H.S., Shih, M.H., "Security aspects of mobile phone virus: a critical survey", *Industrial Management & Data Systems*, 108: 478-494, (2008).
- [4] Xiaoyan Z., Juan F., Xiujuan W., "Android malware detection based on permissions", *Information and Communications Technologies (ICT 2014), 2014 International Conference on*, Nanjing, 1-5, (2014).
- [5] Geneiatakis D., Fovino I. N., Kounelis I. ve Stirparo P., "A Permission verification approach for Android mobile applications", *Computer & Security*, 49: 192-205, (2015).
- [6] Su M.Y., Chang W.C., "Permission-based Malware Detection Mechanisms for Smart Phones", *Information Networking(OCOIN) International Conference*, Phuket, 449-452, (2014).
- [7] Bartel A., Klein J., Le Traon Y., Monperrus M., "Automatically securing permission-based software by reducing the attack surface: an application to Android", *ASE 2012 Proceedings of the 27th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering*, New York, 274-277, (2012).
- [8] Felt A.P., Chin E., Hanna S., Song D., Wagner D., "Android permissions demystified", *CCS '11 Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security*, New York, 627-638, (2011).
- [9] Rosen S., Qian Z., Mao Z.M., "AppProfiler: a flexible method of exposing privacy-related behavior in android applications to end users", *CO-DASPY '13 Proceedings of the third ACM conference on Data and application security and privacy*, New York, 221-232, (2013).
- [10] Enck W., Gilbert P., Chun B.G., Cox L.P., Jung J., McDaniel P., Sheth A.N., "Appsplayground: an information-flow tracking system for realtime privacy monitoring on smartphones", *OSDI'10 Proceedings of the 9th USENIX conference on Operating systems design and implementation*, Berkeley, 393-407, (2010).
- [11] Berthome P., Fecherolle T., Guilloteau N., Lalande J.F., "Repackaging Android Applications for Auditing Access to Private Data", *7th International Conference on Availability, Reliability and Security. IEEE Computer Society*, Prague, 388-396, (2012).
- [12] Rastogi V, Chen Y, Enck W., "Appsplayground: automatic security analysis of smartphone applications", *3rd ACM Conference on Data and Application Security and Privacy*, New York, 209-220, (2013).
- [13] Schreckling D, Kstler J, Schaff M., "Information Security Technical Report. Kynoid: real-time enforcement of fine-grained, userdefined, and data-centric security policies for android", *6th IFIP WG 11.2 international conference on Information Security Theory and Practice: security, privacy and trust in computing systems and ambient intelligent ecosystems*, Berlin, 208-223, (2012).
- [14] Kodeswaran P, Nandakumar V, Kapoor S, Kamaraju P, Joshi A, Mukherjea S., "Securing enterprise data on smartphones using run time information flow control", *13th International Conference on Mobile Data Management. IEEE Computer Society*, Bengaluru, Karnataka, 300-305, (2012).
- [15] Feth D, Pretschner A., "Flexible data-driven security for android.", *2012 IEEE Sixth International Conference on Software Security and Reliability IEEE Computer Society*, Washington, 41-50, (2012).
- [16] Beresford AR, Rice A, Skehin N, Sohan R., "Mockdroid: trading privacy for application functionality on smartphones", *12th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, New York, 49-54, (2011).
- [17] Xiao X, Tillmann N, Fahndrich M, De Halleux J, Moskal M., "Useraware privacy control via extended static-information-flow analysis", *27th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering*, New York, 80-89, (2012).
- [18] Gibler C., Crussell J., Erickson J., Chen H., "AndroidLeaks: automatically detecting potential privacy leaks in android applications on a large scale", *TRUST'12 Proceedings of the 5th international conference on Trust and Trustworthy Computing*, Berlin, 291-307, (2012).
- [19] Rosen S, Qian Z, Mao ZM., "AppProfiler: a flexible method of exposing privacy-related behavior in android applications to end users", *3rd ACM Conference on Data and Application Security and Privacy*, New York, 221-232, (2013).
- [20] Fuchs AP, Chaudhuri A, Foster JS., "Scandroid: automated security certification of android applications", *Tech Rep*, (2009).
- [21] Xing L., Pan X., Wang R., Yuan K., Wang X., "Upgrading your Android, elevating my malware: Privilege escalation through Mobile OS updating", *IEEE Symposium on Security and Privacy*, Washington, 393-408, (2014).
- [22] Fang Z., Han W., Li Y., "Permission based Android security: Issues and Countermeasures", *Computer & Security*, 43 :205-218, (2014).
- [23] Stirparo P., Kounelis I., "The mobileleak project: Forensics methodology for mobile application privacy assessment", *Internet Technology and Secured Transactions: IEEE*, London, 297-303, (2012).
- [24] Orthacker C., Teufl P., Kraxberger S., Lackner G., Gissing M., Marsalek A., Leibetseder J., Prevenhieber O., "Android security permissions- can we

- trust them?”, *Security and Privacy in Mobile Information and Communication Systems*, 94: 40-51, (2011).
- [25] Bartel A, Klein J, Le Traon Y, Monperrus M., “Dexpler: converting Android dalvik bytecode to jimple for static analysis with soot”, *ACM SIGPLAN International Workshop on State of the Art in Java Program analysis*, New York, 27-38, (2012).
- [26] <http://user.informatik.uni-goettingen.de/~darp/drebin/>
- [27] <http://knowyourmobile.com/devices/android-marshmallow/23415/android-marshmallow-review-features-material-design>
- [28] RR Maier D., Protsenko M., Müller T., “A game of Droid and Mouse: The threat of split-personality malware on Andoid”, *Computer&Security*, 1-14, (2015).
- [29] Suarez-Tangil, G., Tapiador, J.E., Peris-L., “DENDROID: A text mining approach to analyzing and classifying code structures in Android malware families”, *Expert Systems with Applications*, 1104-1117, (2014).
- [30] Yerima, S.Y., Sezer, S., McWilliams, G., “Anaylsis of Bayesian classification-based approaches for Android malware detection”, *IET Information Security*, 25-36, (2014).
- [31] Liang, S., Du, X., “Permission-Combination-based Scheme for Android Mobile Malware Detection”, *2014 IEEE International Conference on Communications*, Sydney, 2301-2306, (2014).
- [32] Yerima, S.Y., Sezer, S., Muttik, I., “Android Malware Detection Using Parallel Machine Learning Classifiers”, *2014 18th International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, Oxford, 37-42, (2014)
- [33] Yerima, S.Y., Sezer, S., Muttik, I., “A New Android Malware Detection Approach Using Bayesian Classification”, *2013 IEEE 27th International Conference on Advanced Information Network and Applications*, Barcelona, 121-128, (2013)
- [34] Liu, X., Liu, J., “A Two-layerd Permission-based Android Malware Detection Scheme”, *2nd IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services and Engineering*, Oxford, 142-148, (2014)
- [35]] Liu, W., “Multiple classifier system based android malware detection”, *Internation Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Tianjin, 57-62, (2013)
- [36] Sheen, S., Anitha, R., Natarajan, V., “Android based malware detection using a multifeature collaborative decision fusion approach”, *Neurocomputing*, 905-912, (2015)
- [37] Shen, T., Zhongyang, Y., Xin, Z., “Detect Android Malware Variants using Component Based Topology Graph”, *IEEE 13th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications*, Beijing, 406-413, (2014)
- [38] Kabakus, A.T., Dogru, I.A., Aydın, C., “APK Auditor: Permission-based Android Malware Detection Systems”, *Digital Investigation*, 1-14, (2015).
- [39] Yılmaz, E., Koğar H., “Uç Değerle Baş Etmede Kullanılan Farklı Tekniklerin Bazı İstatistiksel Analiz Sonuçları Üzerindeki Etkisi”, *Journal of Education*, 61-67, (2015).

Influence of Coolant on the Performance of Electro Discharge Hole Drilling

Kürşad GÖV*

Gaziantep Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bil. Fak. Uçak ve Uzay Müh. Böl., Gaziantep/TÜRKİYE

(Received : 25.07.2016 ; Accepted : 05.10.2016)

ABSTRACT

In the present study, a comparative study of hole-EDM drilling of die steel, namely as DIN 1.2080 using electrical discharge machining method was performed in order to discover the effects of coolant types, namely distilled-water, kerosene and water. The electrical parameters of electrical discharge machining process were taken as constant. The performance parameters were defined as machining speed, electrode wear, surface roughness value (R_a) and white layer thickness. The experimental results reveal that the increasing the current causes decreasing in machining speed, increasing in white layer thickness, increasing in electrode wear and decreasing in surface quality of electrical discharge machining process. The distilled-water has comparatively better results than the other coolant types. The results indicated that machining speed 101 mg/min, electrode wear 4,9 mg/min and surface roughness value R_a 2,7 μ m were obtained by using distilled-water at 10 A current level.

Keywords: EDM, EDM Drilling, Coolant, Kerosene, Distilled-water.

Soğutma Sıvısının Elektriksel Erozyon Delik Delme Performansı Üzerine Etkileri

ÖZ

Bu çalışmada, delik elektriksel erozyon işleme yöntemi kullanılarak DIN 1.2080 kalıp çeliğine 2 mm çapında delikler delinmiş ve farklı soğutma sıvılarının performansa etkileri incelenmiştir. Musluk suyu, saf (de-iyonize) su ve kerosenin kullanıldığı deneysel çalışmada elektriksel erozyon işleme parametreleri sabit tutulmuştur. Performans parametreleri olarak; iş parçası işleme hızı elektrot aşınması, yüzey pürüzlülük değeri (R_a) ve beyaz katman tabakası kalınlığı alınmıştır. Deneysel sonuçları, elektriksel erozyon parametrelerinden akımın artması, işleme hızını yavaşlatmış, beyaz katman tabakasını arttırmış, elektrot aşınmasını arttırmış ve yüzey kalitesini kötüleştirmiştir. Ayrıca soğutma sıvısı olarak de-iyonize suyun kullanımı diğer soğutma sıvılarına göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Sonuç olarak, 101 mg/dak işleme hızı, 4,9 mg/dak elektrot aşınması ve 2,7 μ m ortalama yüzey pürüzlülük değeri, 10 A akım değerinde de-iyonize su kullanıldığında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: EEİ, EEİ Delik Delme, Soğutma Sıvısı, Kerosen, De-iyonize Su.

1. INTRODUCTION

Electrical discharge machining (EDM) is one of the advanced metal cutting process that it takes place the conventional machining processes such as drilling and milling. EDM is proficient of machining complex geometries and advanced materials that are specified as hard to machine materials. EDM processes are classified into three main categories such as Wire-EDM, Sink-EDM and Hole-EDM. sink-EDM is used for manufacturing the dies whose shape is the reversed of the electrode tool. Wire-EDM is used to manufacture extrusion dies brass and copper electrodes are used in wire-EDM process. High diameter to depth ratio holes are drilled by Hole-EDM process by using 6 mm to 0.3 mm tabular brass and copper electrodes. Drilling small holes is one of the main machining processes; approximately 35% of all manufacturing time is spent to drill holes. Conventional drilling techniques cannot be

employed to produce narrow holes on advanced materials as tool breakage/wear and slow machining speed cause imprecise hole sizes and improper surface characteristic. The performance of advanced parts such as combustion chambers and turbine blades directly related to the great number of slight cooling holes for hot components.

Conventional cooling holes have diameter from 2 to 4 mm and have length to diameter ratio from 1 to 200 [1]. Electrical discharge machining process takes away microchips from the workpiece surface by aid of a sequence of repetitive electrical flushing. The EDM process is accomplished by applying a sequence of distinct discharges between the workpiece and the electrode cooled by a coolant. By using hole-EDM process; injection mould cooling holes, fuel injectors, turbine blade holes and starting holes of wire-EDM are machined [2-4]. The main performance parameters of hole-EDM process are the machining speed, electrode wear, surface quality and the white layer thickness [1]. In all EDM processes, white layer (recast layer) is generated. The workpiece profile, surface quality and the

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: gov@gantep.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 191-196

dimensional accuracy are directly related to the white layer characteristic [5].

Eyercioglu et al. [1] reported that the effect of EDM parameters is more important than the effect of the other parameters on hole-EDM process. Yilmaz and Okka [6] investigated the single and multi-channel copper and brass electrodes in hole-EDM process for Inconel and titanium alloys. They concluded that the brass electrodes have better MRR and EW performance than copper electrodes. And also, they showed that the single-channel electrodes have better performance than the multi-channel electrodes. Though, the surface quality is better when using multi-channel brass electrode. Kuppan et al. [7] reported that MRR is affected by duty factor, tool rotation and current, while current and pulse on time effect the surface quality. Singh et al. [8] studied the effect of EDM parameters over performance parameters of sink-EDM and they concluded that taper angle, MRR, surface quality and increase whereas the pulse on-time and current were higher. Özgedik [9] studied the history of the electric discharge machining process as a non-traditional manufacturing area. The performance of the Wire-EDM process [10-12] was studied and the effects of input parameters on performance were discussed by some researchers. In micro hole-EDM process, the effect of pulse energy on surface quality and workpiece geometry for blind holes was studied by Ekmekci et al. [13]. The effects of input parameters on the response parameters for example surface quality and average circularity of the drilled holes in nickel-based super alloy was studied by Yadav et al. [14]. Janmanee and Muttamara [15] studied the effect of EDM parameters on EWR, MRR and taper angle of AISI 431 martensitic stainless steel. The recast layer creation was much thinner by using oxygen-assisted hole-EDM machining process. Gov [16] investigated that the effects of the dissolved oxygen in the coolant on the hole-EDM performance parameters such as MR, EW, surface quality, over cut, taper and WLT. The results showed that the increasing in the oxygen dissolution in the coolant, improving the performance parameters. The vibration effects on EDM performance was studied by Çogun et al. [17, 18] they concluded that the EDM performance was improved by using vibration on EDM process. The variations of machining performance outputs were studied with the EDM parameters for metallic powder mixed coolant in EDM by Çogun et al. [19] it is reported that the powder concentration and powder type in the coolant and the pulse-on time were current output parameters of EDM process. The powder mixed EDM was studied by Ekmekci et al. [20], the SiC powder mixed distilled water was used as coolant fluid. They concluded that the surface morphology extremely affected the powder as means of secondary discharges and particle migration from dielectric liquid. Some researcher studied the different coolant types, especially water was used as coolant in EDM process [21-23]. Yan and Chen [24] studied the effect of different coolant for the titanium alloys, and showed that when kerosene is

used as a coolant, the material removal rate is lower and electrode wear rate is higher compared to the distilled-water. The urea added distilled-water was studied by Yan et al. [25] It is indicated that the nitrogen decomposed from the coolant, resulting in good wear resistance of the machined surface after EDM. In this study, electro discharge hole drilling process was applied to DIN 1.2080 die steel by using single-channel brass electrode and three types of coolants (Distilled-water, kerosene and water). In the study the electro erosion parameters of arc on-time (T_{on}), arc off-time (T_{off}), and capacitance (C) kept constant and the effect of the current (I) and coolant types on the performance parameters such as machining speed (MS), electrode wear (EW), average surface roughness value (R_a), and white layer thickness (WLT) were examined.

2. MATERIAL AND METHOD

Experiments were performed by using JS-EDM AD-20 type hole electrical discharge machine. The samples were prepared by 10x10x40 mm DIN 1.2080 die steel which were cut by wire electro discharge machining. Each face of the samples was ground by emery papers gradually and polished by using 1 μ m diamond suspension before drilling. 2 mm diameter single-channel brass electrode was used for drilling the holes which were drilled on the centre of the matched polished faces vertically (Figure 1.). The major electrode material properties are given in Table 1. Experiments were performed in three repetitions and the performance parameters were defined by the average of these three measurements. EDM parameters such as current, arc on-time, arc off-time, and capacitance were chosen as the optimum values which were reported by Eyercioglu et al. [1] The list of the EDM parameters are given in Table 2.

Table 1. Electrode Properties

Electrode	Brass
Melting point ($^{\circ}$ C)	900-950
Thermal conductivity (W/m- $^{\circ}$ K)	160
Electrical resistivity (ohm-cm)	4.71
Specific heat capacity (J/g- $^{\circ}$ C)	0.38

Table 2. Experimental Parameters

Fixed parameters	Value
Time on, T_{on} (μ s)	30
Time off, T_{off} (μ s)	10
Capacitance C (μ F)	1422
Voltage (volt)	30
Electrode rotation (rpm)	200
Coolant pressure (bar)	100
Electrode polarity	Negative (-)
Variable parameters	
Coolant types	Distilled-water, Kerosene, Water
Current, I (Ampere)	10,11,12

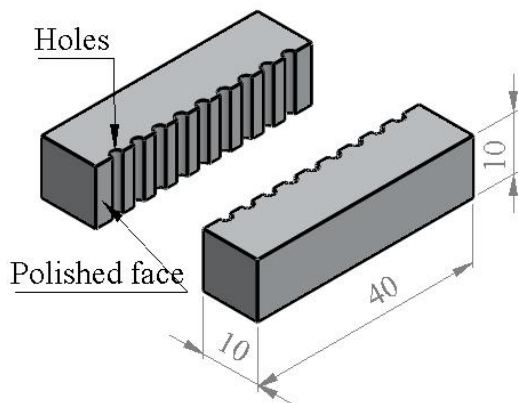


Fig. 1. Photograph of the specimen

EDM drilling process is schematically explained in Figure 2. Spark intensity is concentrated on the tip of the electrode in EDM drilling process. This spark intensity causes high erosion at the tip of the electrode rather than the other portion of the electrode. This high erosion causes the taper on the tip. The electrode is initially flat and sharp edges (Figure 2-a). Taper is created during the EDM drilling process due to the high-level erosion (Figure 2-b). This taper causes the taper at the exit of the EDM drilled hole (Figure 2-c). This view is known as bullet protrusion. Because of the leaving electrode tip from the specimen, the cooling and chip removal is stopped and this event causes the burning on surface or welding of electrode with workpiece surface.

surface. And the effects of the coolant types on the performance were investigated.

3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

3.1. Machining Speed

EDM is defined as the high-energy sparks that occur between the workpiece and electrode cause material removal and evaporation. In EDM process, the machining speed is defined as the amount of material removal at unit time. In EDM process high machining speed is intended and the studies are performed at this situation. In this study, the specimens were weighed before and after the experiments by using 0,1 mg sensitive Shimadzu AUX220 digital balance. The machining time was measured by using digital stopwatch. And the machining speed was calculated by equation (1).

$$MS \left(\frac{\text{mg}}{\text{min}} \right) = \frac{\text{initial weight} - \text{final weight}}{\text{Machining time}} \quad (1)$$

In this study, three types of coolants and three types of current level were used. The effects of coolant types versus current on machining speed for DIN 1.2080 die steel are shown in Figure 3. When machining speed is considered according to the current, the MS is decreased as the current increased for all coolant types. The better MS was obtained at 10 A current value as approximately 100 mg/min for this workpiece material. When MS of the coolant types are compared, distilled-water has the better machining speed than the other coolants. And the kerosene type coolant performed better machining speed

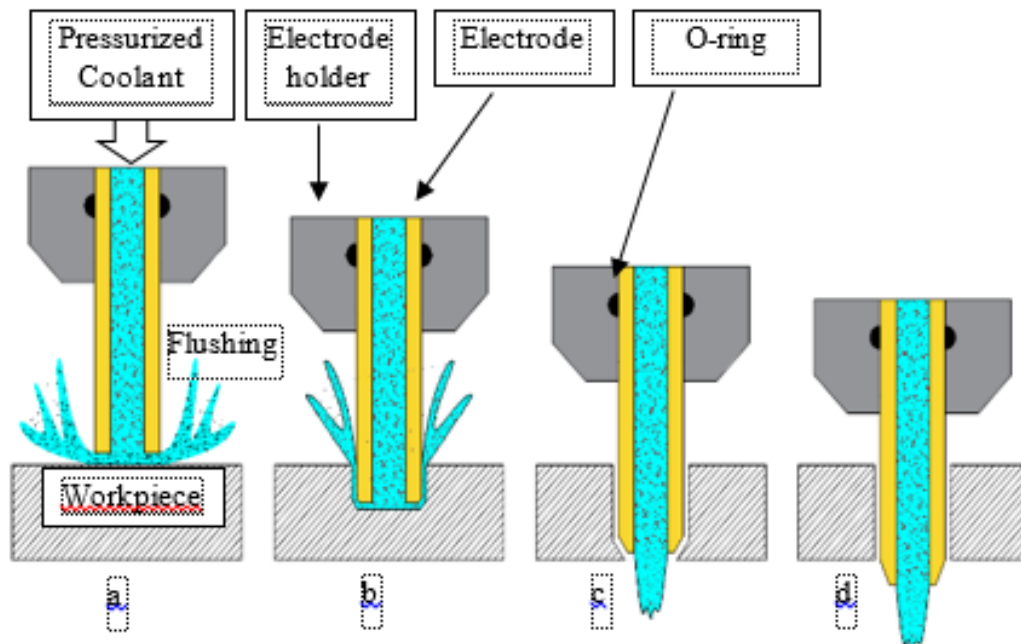


Fig. 2. Electrode wear (a) initial stage; (b) taper starting; (c) full taper; (d) leaving specimen

In this study, the performance parameters are defined as machining speed, electrode wear, surface roughness value (R_a) and white layer thickness of the workpiece

compared to the tap water.

Figure 3 shows the response trends for the influence of distilled-water on MS. More sparking time prolongs the melting and vaporization phenomenon. With the use of

distilled-water, wider discharge channel and longer energy discharge cycles were resulted, which eventually prolonged melting and evaporation and resulted in higher MS [26]. The higher MS obtained in the case of distilled-water maybe due to higher thermal conductivity which could have allowed more thermal energy transfer toward the sparking area.

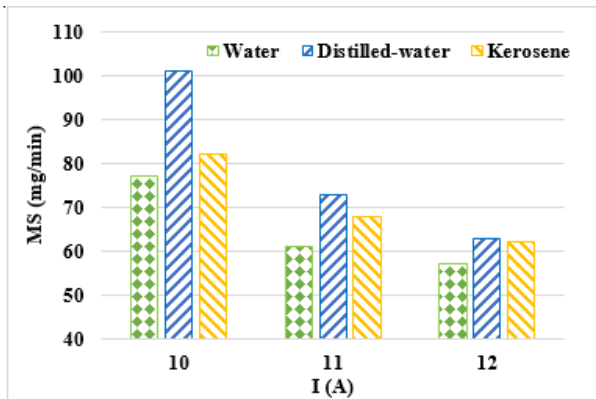


Fig. 3. Machining speed

3.2. Electrode Wear

In EDM process, high temperature sparks provide the chip removal from the workpiece at the same time these sparks erode the electrode. This erosion is known as electrode wear in EDM process. In EDM drilling process, machined geometry is directly related to the electrode wear, so the minimum electrode wear gives better geometric performance on workpiece. In this study, the electrodes were weighed before and after the machining by 0,1 mg precision digital balance. And the electrode wear was calculated by using equation (2).

$$EW \left(\frac{mg}{min} \right) = \frac{\text{initial weight} - \text{final weight}}{\text{machining time}} \quad (2)$$

In present study, the electrical parameters of t_{on} , t_{off} and capacitance (C) were taken constant and the effect of the current and coolant types on the electrode wear was examined. EW is generally depending on the EDM parameters, electrode and coolant [27]. It is shown in Figure 4; the electrode wear is lower for distilled-water than kerosene and water type of coolants for all current levels. And the kerosene type coolant has the lower electrode wear compared to the water.

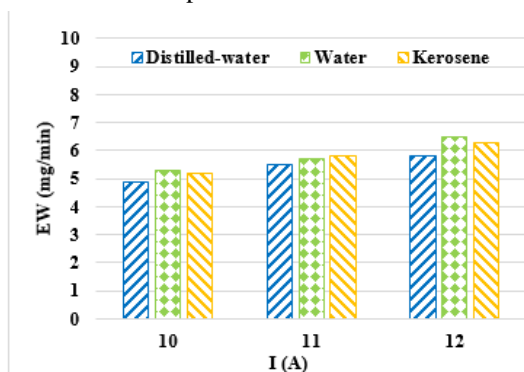


Fig. 4. Electrode wear

Figure 4 shows the response plots for the influence of coolants on EW. Using kerosene and tap water reduce the area for striking positive ions on work surface due to narrow plasma discharge channel. Higher ions in the kerosene and tap water ensure fresh gap condition for subsequent sparking cycles by allowing reionisation of the ionized gap condition and minimizes the chances of unwanted arcing [28]. Lower MS obtained in case of kerosene and distilled water may be due to withstand ionized state for longer duration and longer material erosion cycles of electrode.

3.3. Surface Roughness

In EDM drilling process, the average surface roughness value (R_a) is related to the electrical parameters of the EDM. In the present study, the EDM electrical parameters were taken as constant. The surface roughness value (R_a) was measured by using Mitutoyo SJ 401 stylus type surface roughness measuring machine. Measures were performed according to the standard tables as the cut-off length 0.8 and sampling length 4 mm. The surface roughness value was taken as the average of the 3 measurements of each hole. In this study, the results show that the use of distilled-water as coolant provides better surfaces quality, the R_a value was measured about 2,7 μm for distilled-water. The kerosene type of coolant performed the surface roughness value of nearly 3,0 μm at 10 A current value. Approximately 4,2 μm surface roughness value was obtained by using water at 12 A current value. And also, the results concluded that the current increasing, increases the surface roughness value from 2,7 to 4,2 gradually.

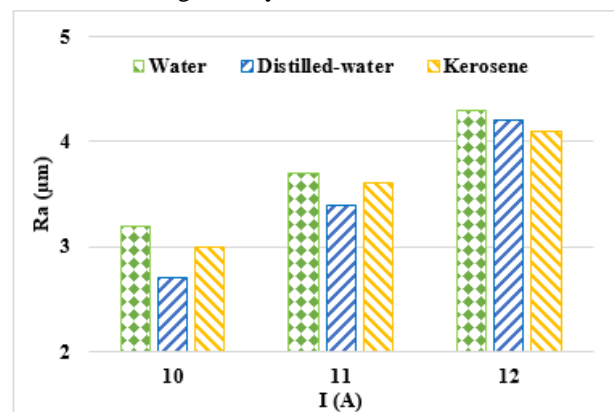


Fig. 5. Surface roughness

Results in Figure 5 show the response trends for average surface roughness value (R_a) under the influence of coolants. Sparks strike on the work material more intensely at higher current causing more material to be ejected due to impact force developed. Furthermore, an increase in energy due to current increases energy penetration in the material surface which eventually results into deeper and wider craters which in turn results into coarser surface [26, 29]. However, resulted lower R_a in the case of distilled water may be due to wider discharge channel and longer energy discharge cycles

were resulted, which eventually prolonged melting and evaporation and resulted in lower R_a value.

3.4. White Layer Thickness

In all types of EDM processes, white layer is generated, related to the high electrical discharge that is caused by the high temperature generation and sudden cooling between the workpiece and electrode. This white layer has very hard and brittle properties. Thermal stresses are generated in the white layer and it causes the micro cracks which lays from white layer to main material [30]. These micro cracks tend to develop from the white layer to main material and they decrease the fatigue strength and service life of the part [30]. Through the EDM drilling of holes, white layers are created at the side wall of each hole. The WLT at the wall of the hole was measured since it is the surface exposed to continuous machining throughout the hole-EDM drilling process. In this section, the effects of electrodes and current coupled with the hole-EDM drilling process on average white layer thickness were compared. Moreover, as white layer thickness was not uniform throughout the machined surface, a representative average white layer thickness was determined. Figure 6 shows that white layer thicknesses of the EDM drilled holes were changing from 10 μm to 20 μm . The WLT increases when the current increases. The distilled-water type coolant has the lower WLT of 12 μm then the kerosene and water ones. White layer thickness increases when the current increases. The WLT of 19 μm was obtained by using water type of coolant at 12 A current level.

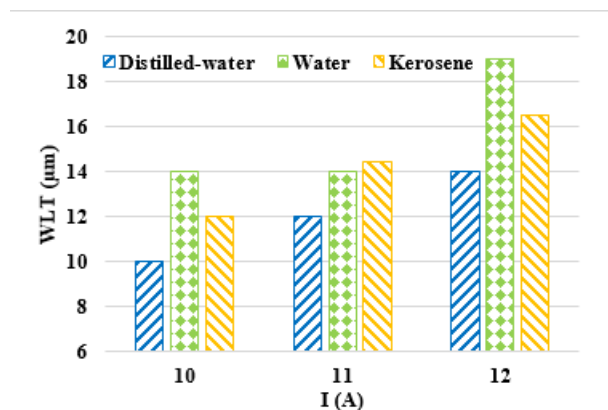


Fig. 6. White layer thickness

Figure 6 represents the effect of coolants on the behaviour of WLT. It can be seen that kerosene and tap water influenced the WLT to a marginal extent. Using distilled water ensures fresh gap condition for subsequent sparking cycles by allowing reionisation of the ionized gap condition. Also, smaller and shallower craters are formed due to reduced sparking time to decrease WLT. However, lower WLT obtained in the case distilled water may be due to lower ion content which could have allowed uniform energy density on the work material surface which in turn resulted into shallower and smaller crater formation [29].

4. CONCLUSIONS

The outcomes of this study can be concluded as:

- Nearly 50 percent decrease in MS has been achieved by using the distilled-water compared to the kerosene and water types of coolant. This provides a significant improvement of the machining time for EDM drilled deep holes.
- MS is decreased as the current increased for each condition. The better MS was obtained at 10 A and distilled-water type of coolant.
- Electrode wear is reduced approximately 20% by using distilled-water. This means, electrode life increased and also manufacturing cost decreased.
- EW is increased as the current increased for all coolants. The minimum EW (4,9 mg/min) was obtained at 10 A and distilled-water.
- Surface roughness value is increased as the current increased for all coolants. The better surface quality was obtained at 10 A and distilled-water type of coolant.
- Approximately 30 percent surface improvement has been achieved by using distilled-water.
- Nearly 30% white layer reduction was obtained by using distilled-water as coolant. It can be expected that the service life and fatigue strength of the workpiece will be improved by decreasing the white layer thickness.

REFERENCES

- [1] Eyercioglu, O., M.V. Cakir, and K. Gov. "Influence of machining parameters on the surface integrity in small-hole electrical discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(1): 51-61. (2014).
- [2] Yusuf Keskin, H., H. Selcuk, and K. Mevlut. "An experimental study for determination of the effects of machining parameters on surface roughness in EDM", *International Journal of Advance Manufacturing Technology*, 28: 1118-1121. (2006).
- [3] Puranik, M.S. and S.S. Joshi. "Analysis of accuracy of high-aspect-ratio holes generated using micro-electric discharge machining drilling", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 222(11): 1453-1464. (2008).
- [4] Mujumdar, S.S., S.A. Mastud, R.K. Singh, and S.S. Joshi. "Experimental characterization of the reverse micro-electrodischarge machining process for fabrication of high-aspect-ratio micro-rod arrays", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 224(5): 777-794. (2010).
- [5] Kurnia, W., P.C. Tan, S.H. Yeo, and Q.P. Tan. "Surface roughness model for micro electrical discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 223(3): 279-287. (2009).
- [6] Yilmaz, O. and M.A. Okka. "Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling

- performance", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51(1-4): 185-194. (2010).
- [7] Kuppan, P., A. Rajadurai, and S. Narayanan. "Influence of EDM process parameters in deep hole drilling of Inconel 718", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 38(1-2):74-84. (2008).
- [8] Singh, P.N., K. Raghukandan, M. Rathinasabapathi, and B. Pai. "Electric discharge machining of Al-10% SiC p as-cast metal matrix composites", *Journal of materials processing technology*, 155: 1653-1657. (2004).
- [9] Özgedik, A. "Elektro Erozyon ile İşlemede Tezgaah, İşparçası ve Elektrot Üzerinde Uygulanmış Modifikasyonlar", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11(2): 19-38. (2014).
- [10] Özkul, İ., U. Şeker, B.B. Buldum, and A. Akkurt. "Sıcak İş Takım Çeliklerinden Dievar Takım Çeliğinin Tel Erozyon İle İşlenebilirliğinin Araştırılması", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(4): 31-44. (2012).
- [11] AY, M. and D. Aydoğdu. "Tel Erozyonda Kesme Parametrelerinin Parçanın Boyut Ölçüsüne Etkilerinin Deneysel İncelenmesi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(13): 31-44. (2010).
- [12] Çaydaş, U. and A. Hasçalık. "Tel Erozyon Yönteminde İşleme Parametrelerinin Alüminyum Alaşımının Yüzey Yapısına Etkisi", *Politeknik Dergisi*, 7(1): (2004).
- [13] Ekmekci, B., A. Sayar, T.T. Öpöz, and A. Erden. "Geometry and surface damage in micro electrical discharge machining of micro-holes", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 19(10): 105030. (2009).
- [14] Yadav, U.S. and V. Yadava. "Experimental investigation on electrical discharge diamond drilling of nickel-based superalloy aerospace material", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. (2015).
- [15] Janmanee, P. and A. Muttamara. "A study of hole drilling on stainless steel AISI 431 by EDM using brass tube electrode", *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies*, 2(4): 471-481. (2011).
- [16] Gov, K. "Investigation of the Effects of the Dissolved Oxygen in the Coolant on the Hole Geometries Drilled by Electro Erosion", *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(2): 231-239, (2016).
- [17] Özgedik, A. and C. Çoğun. "Elektro-Erozyon İle İşlemede İşleme Haznesine Uygulanan Titreşimlerin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 8(3): 13-25, (2011).
- [18] Özgedik, A. and C. Çoğun. "Farklı İşleme Derinliklerinde Uygulanan Titreşimlerin Elektro-Erozyon ile İşleme Performansına Etkisi", *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 11(3): 1-9. (2014).
- [19] Çoğun, C., B. Özerkan, and T. Karaçay. "An experimental investigation on the effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 220(7): 1035-1050, (2006).
- [20] Ekmekci, B., F. Ulusöz, N. Ekmekci, and H. Yaşar. "Suspended SiC particle deposition on plastic mold steel surfaces in powder-mixed electrical discharge machining", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 229(3): 475-486. (2015).
- [21] Masuzawa, T., K. Tanaka, Y. Nakamura, and N. Kinoshita. "Water-based dielectric solution for EDM", *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 32(1): 119-122, (1983).
- [22] Jilani, S.T. and P. Pandey. "Experimentnal investigations into the performance of water as dielectric in EDM", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 24(1): 31-43, (1984).
- [23] Wu, K.L., B.H. Yan, J.-W. Lee, and C.G. Ding. "Study on the characteristics of electrical discharge machining using dielectric with surfactant", *Journal of materials processing technology*, 209(8): 3783-3789, (2009).
- [24] Chen, S., B. Yan, and F. Huang. "Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V", *Journal of Materials Processing Technology*, 87(1): 107-111, (1999).
- [25] Yan, B.H., H.C. Tsai, and F.Y. Huang. "The effect in EDM of a dielectric of a urea solution in water on modifying the surface of titanium", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(2): 194-200, (2005).
- [26] Shabgard, M.R., M. Seyedzavvar, and S.N.B. Oliaei. "Influence of input parameters on characteristics of EDM process", *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 57(9): 689-696, (2011).
- [27] Hasçalık, A. and U. Çaydaş. "Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V)", *Applied Surface Science*, 253(22): 9007-9016, (2007).
- [28] Fonseca, J. and J.D. Marafona. "The effect of deionisation time on the electrical discharge machining performance", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 71(1-4): 471-481, (2014).
- [29] Valaki, J.B., P.P. Rathod, and C. Sankhvara. "Investigations on technical feasibility of Jatropha curcas oil based bio dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM)", *Journal of Manufacturing Processes*, 22: 151-160. (2016).
- [30] Ergün, Z.E. and C. Çoğun. "Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) İş Parçası Yüzey Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi", *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(3): (2006).

Loss Calculation Technique With Randomize Load Curves

Ahmet ÖNEN*

Department of Electrical and Electronics Engineering, Abdullah Gul University, Kayseri, Turkey.

(Received : 24.07.2016 ; Accepted : 11.11.2016)

ABSTRACT

Calculating feeder losses accurately is an important part of evaluating designs for electric power distribution systems. Historically, these losses have been calculated one of three ways: (1) using a peak load calculation and the load factor method, (2) using customer class statistics normalized for a month, season, or year, or (3) using customer class statistics together with feeder measurements to reflect the variation in load every hour of the year. The first two methods require far less data but provide far less accuracy than the third method. In this paper, the authors present a method of calculating losses that achieves better accuracy than the first two methods without the large data requirements of the third method.

Keywords : Load Factor Method, Measurements, Lagrange Interpolation, Advanced Metering Infrastructure (AMI), Loss Calculation.

Rastgele Yük Eğrisi Metodu ile Elektrik Kayıplarının Hesaplanması

ÖZ

Fiderlerin elektrik kayıplarının doğru biçimde hesaplanması elektrik dağıtım sistemlerini değerlendirirken çok önemli bir paya sahiptir. Geçmişte, bu kayıpların hesaplanması üç değişik metod ile yapıldı: (1) en yüksek yük hesaplaması ve yük faktörü metodunun kullanımı ile (2) normalize edilmiş müşteri sınıf istatistiklerinin aylık, sezonluk ve yıllık kullanımı ile ve (3) müşteri sınıf istatistiklerinin fider ölçümlerinde kullanarak yükün yıl içinde her saat değişimini dikkate alarak kullanımıdır. Bunlardan ilk ikisi daha az bilgi gereksinimine ihtiyaç duymasına rağmen üçüncü metoda göre daha az doğruluk payları vardır. Bu çalışmada, elektrik kayıplarının hesaplanması için yeni bir metod kullanılacak ve bu ilk iki metoddan daha doğru sonuçlar elde edilecek ve aynı zamanda üçüncü metodun gereksinim duyduğu geniş bilgi ihtiyacına da gerek kalmayacaktır.

Anahtar Kelimeler : Yük Ölçüm Metodu, Ölçümler, Lagrange Enterpolasyonu, İleri seviye ölçüm altyapısı (AMI), Kayıp Hesaplanması.

1. INTRODUCTION

When planning engineers are laying out new feeders or reconfiguring or updating existing feeders, they want to either choose the least expensive design that meets certain criteria or else choose the design with the highest cost-benefit ratio. Part of calculating the costs of each design includes the cost of the electrical energy losses that will be incurred on the feeder over time. The accuracy with which these losses can be calculated may impact the decision of which design, if any, is implemented.

The accuracy of the calculation of feeder losses is largely dependent upon the accuracy of the load model [1-3]. In the past, many engineers worked only with a peak load model [4-6]. For a new feeder, there would be rough assumptions about how much load would be located in various areas, but when planning upgrades to existing

feeders, there would often be a peak feeder reading from a circle chart that would assist in modeling the peak load. A power flow calculation [7] would then produce the total losses for the feeder, and the load factor would be used to estimate the losses for the whole year.

As the cost of metering equipment fell, utilities became able to generate load statistics for different types of customers to help them create "typical" load curves for more accurate calculation of losses [8-9]. By gathering hourly metered measurements for just a few meters of a few different customer types, the utility could generate an approximate load curve for each type of customer for each season or month for each type of day (weekday/weekend). These load curves would be scaled at each customer meter based on the kWh of consumption billed for each month of the year. Power flow calculations would then be done for each hour for each type of day for each season or month, and the losses would be calculated at each hour. By modeling the time-varying nature of loads, a more accurate estimate of losses could be achieved [10-11].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: ahmet.onen@agu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 197-203

When flow measurements are available at the start of the feeder, these "typical" load curves could be adjusted to match the feeder flow measurements, resulting in even greater accuracy. With one measurement for each hour of the year, 8760 power flow calculations could be made to calculate the losses for the year. With the increased data and increased calculations, a large increase in accuracy was possible.

In rare cases, a utility may have hourly metered loads at every point of service, often called AMI (advanced metering infrastructure) [12-16]. As of the writing of this paper, however, very few utilities have extensive installations of such meters combined with the electrical model to make effective use of this data.

Without AMI, using feeder flow measurements to adjust customer class load statistics offers the most accurate calculation of losses. Feeder flow measurements, however, are not available on all feeders, nor are they helpful when adding significant numbers of new loads, as these new loads must be modeled in some time-varying way to be used together with the feeder measurements. In this paper, the authors present a method of modeling loads that makes effective use of a peak load measurement or estimate as well as customer class load statistics, without requiring feeder measurements for every hour of the year.

In section 2, the older load modeling and loss calculation methodologies will be presented in more detail, followed by a presentation of the new load modeling method in section 3. These methods are then compared in section 4 for a few feeders for which both monthly kWh billing data and hourly feeder measurements were available. Finally, in section 5, the work is summarized and some conclusions are drawn.

2. PREVIOUS METHODOLOGIES

Loss calculation methodologies have advanced in direct correspondence with the availability of more detailed measurements on the power system. Starting with the load factor method requiring no more than a measurement or estimate of the total feeder flow and progressing to the more precise time-varying load flow analysis using AMI measurements, electrical power system engineers have seen the complexity of the mathematical problem rise together with increased accuracy.

2.1. Load Factor Method

The earliest and simplest method uses a single measurement (or estimate) of the peak feeder demand and a rough model of how that load is distributed, as well as a load factor. The peak feeder demand may either be estimated or read from a circle chart. The load distribution varies from an assumed even distribution of load over the feeder to a model representing each transformer kVA where the load is assumed proportional to the transformer rating. Regardless of how the load is modeled, a power flow analysis is performed using the

estimated peak demand on the feeder to calculate the energy losses at peak.

The load factor (LF) represents the ratio of average annual energy consumption to peak demand, as shown in Equation 1.

$$LF = \frac{P_{avg}}{P_{peak}} \quad (1)$$

Using the peak load flow results and the load factor, the average losses may be calculated using Equation 2, and these average losses are multiplied by the number of hours in a year (assuming 8760 hours in a year) to provide the total annual losses, as shown in Equation 3.

$$Loss_{avg} = Loss_{peak} * LF^2 \quad (2)$$

$$Loss_{total} = Loss_{avg} * 8760 \quad (3)$$

This approach to calculating annual losses on a feeder leads to an underestimation of the losses and a further underestimation of the cost of losses, as proven in reference [17].

2.2. Customer Class Load Statistics Method

Of course, in order to bill their customers correctly, utilities have been measuring more than merely the peak demand at the feeder even since the earliest power systems infrastructure was being built. In order to make use of these measurements in a load flow analysis, however, one must be able to convert the total monthly kilowatt-hour consumption into a kilowatt demand at a given hour of the year.

By metering a few loads, a generic load curve could be estimated for various customer types for various seasons or months and for various types of days. The monthly kilowatt-hours read from customer meters (or anticipated consumption based on energy sales to similar customers) could then be divided among the hours of the month based on the typical load curve and the types of days. For example, in Figure 1, we have a sample plot for two different customer types (residential and commercial) and two different types of day (weekday and weekend). The vertical axis of Figure 1 shows the kW demand at each hour based on a total monthly consumption of 1000 kWh. For a residential customer with only 500 kWh, the load curve would take the same shape but each value would be halved.

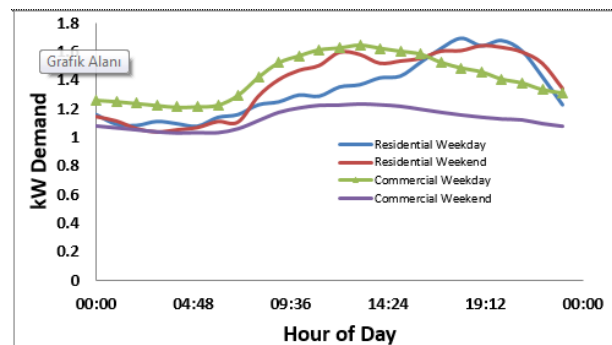


Fig. 1. Comparison of kW demand for two different customer types and Days

The number of distinct daily curves depends on the variation in customer load. For some utilities, four seasons and two types of day (weekday/weekend) may prove sufficiently accurate. For other utilities, there will be different curves for each day of the week for each month of the year, resulting in 2016 hourly curve points (12 months x 7 day types x 24 hours/day). Modeling holidays independently would add additional curve points to be analyzed.

A more precise formulation is given in Equations 7-10 of reference [11].

2.1. Customer Class Load Statistics With Measurement Matching

An obvious shortfall of the customer class load statistics method is that the load is assumed to be the same for many days in a given month. Without representing the variation in load, the total losses will be underestimated by the same proof as given in [11]. If feeder measurements are available, the loads produced by the customer load statistics and monthly kWh billing data can be scaled at each hour to match the feeder flow measurement. This then provides the variation in load needed to greatly improve the accuracy of the total feeder losses calculation.

2.2. Fully Metered Loads (AMI)

When matching feeder measurements, the total feeder flow is accurate but the actual distribution of the load is only as accurate as the customer load statistics. If the actual loads were known at each point of service, then the feeder measurement would not be needed (or would only be needed to help scale unmetered loads or to identify significant errors in the metered loads). This type of information is provided by advanced metering infrastructure (AMI). While the extent of AMI deployment has been increasing over the last several years, such detailed measurements are not available in much of the service territory around the world.

Table 1 below shows the variations in amount and types of data required as well as the variation in amount of calculations required. The rows are listed in order of increasing accuracy which corresponds with increasing

data requirements and increasing computational cost. In this case, the customer load statistics method uses two daily curves per month (weekday and weekend), resulting in 576 time points (12 months x 2 day types per month x 24 hours per day type).

Table 1 provides inspiration for another load modeling technique introduced below. Since greater accuracy is possible with greater measurements and increased analysis times, another row could be introduced between the customer load statistics and the customer load statistics scaled for feeder measurements: a row that uses the peak feeder flow as well as the monthly kWh consumption which also models time variation for all 8760 hours of the year, not just for 576 hours per year. It is this new method to which we now turn.

3. RANDOMIZED CUSTOMER CLASS LOAD STATISTICS METHODOLOGY

When neither AMI measurements nor feeder flow measurements are available, or when feeder flow measurements are insufficient due to large load growth on the feeder, the planning engineer is left with only two sets of data to use in modeling the load: (1) an expected peak load for the whole feeder and (2) customer class load statistics and either actual or estimated monthly kWh consumption data. The load factor method makes use of the former but not the latter, with rather poor accuracy. The customer class load statistics method makes use of the latter but not the former with somewhat improved accuracy. Even greater accuracy is available to the engineer if both the feeder peak load can be used as well as the anticipated kWh consumption. Our proposal is to take the "typical" daily load curves calculated from the customer class load statistics and scale them randomly throughout the month such that the following two conditions are met: (1) the total consumption matches the provided kWh consumption forecasts and (2) that the peak load on the feeder matches the forecasted feeder peak. The feeder peak helps to put an upper bound on the randomized scaling. A third piece of data, the ratio of the average load to the minimum load, is used to set the lower bound on the randomized scaling. While this ratio is not as likely to be known for individual feeders, the utility

Table 1. Comparison of Data Required For Each Methods

Method	Measurement Data Requirements	Number of Time Points Analyzed for One Year
Load Factor	Peak Feeder Flow	1
Customer Load Statistics	Monthly kWh Consumption per Service Point	576
Customer Load Statistics Scaled for Feeder Measurements	Hourly Feeder Flow Measurements + Monthly kWh Consumption per Service Point	8760
Power Flow with AMI Data	Hourly Load Measurements at Every Service Point	8760

will often have a rule-of-thumb number that may be used (for utilities involved in both the generation and distribution of electric energy, this ratio is part of planning their base load generation and thus likely has good data behind it). Even if the minimum-to-average load ratio is not chosen accurately, it will not prevent the model from achieving both objectives listed above.

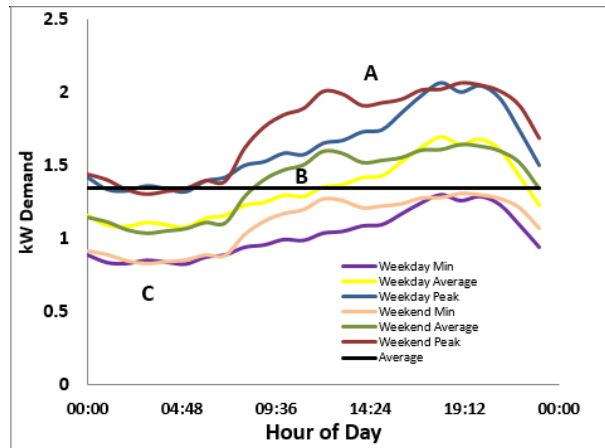


Fig. 2. Scaled Residential Load Curves

In Figure 1, the residential customer type has a minimum load point on the weekend and a maximum load point on the weekday. The three constraints listed above can be explained in terms of the scaled residential load curves shown in Figure 2. The upper bound of the scaling is determined by the average-to-peak ratio (B / A in Figure 2) and the lower bound of the scaling is determined by the minimum-to-peak ratio (C / A in Figure 2). The average must be maintained so that the total consumption on the feeder matches the total kWh billed to the customers. The maximum scaling factor (SF) for the i^{th} type of day can be calculated in terms of the average load curve (scaling factor of 1.0) using Equation 4.

$$SF_{Max_i} = \frac{DailyAvg_i}{DailyPeak_i} * \frac{MonthlyPeak}{MonthlyAvg} \quad (4)$$

The minimum scaling factor can likewise be calculated using Equation 5.

$$SF_{Min_i} = \frac{DailyAvg_i}{DailyMin_i} * \frac{MonthlyMin}{MonthlyAvg} \quad (5)$$

The curves in Figure 2 assume an average-to-peak ratio of 0.65 and a minimum-to-peak ratio of 0.4. Using these values, the scaling factors for each curve are calculated as shown in Table 2.

Table 2. Scaling Factors For Each Curve

Type of Day	$\frac{DailyAvg}{DailyPeak}$	$\frac{DailyAvg}{DailyMin}$	SF_{Max}	SF_{Min}
Weekday	0.793	1.245	1.220	0.766
Weekend	0.817	1.294	1.257	0.796

The randomization function that satisfies these three constraints can be depicted as a cumulative distribution function which must pass through (0, SFmin), (0.5, 1.0)

and (1.0, SFmax). These three points may be interpolated using Lagrange interpolation to provide the randomization functions, as shown in Figure 3. For each customer type, then, a distinct Lagrange interpolation function must be calculated. Note that, although the maximum scaling factor is larger for the weekend, the peak will still (on average) be on a weekday, since the weekday curve starts out higher.

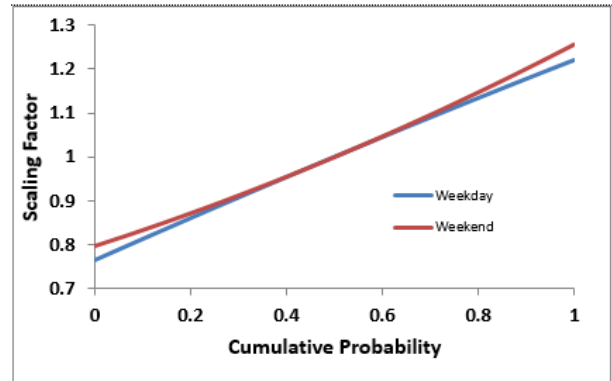


Fig. 3. Randomization Function produced by Lagrange Interpolation

Since the load curve shape is to be maintained, all loads of a given type shall have the same scaling factor for the entire day; i.e., the entire daily curve gets scaled 28 to 31 times a month, depending on the number of days in the month. Additionally, in order for the feeder peak and minimum to correspond to the monthly peak-to-average and minimum-to-peak ratios, and, in respect of the fact that loads are often temperature-dependent, the same random number must be supplied to each Lagrange interpolation function for each day of the month. Thus, all loads on the system will see their highest weekday on the same day of the month, and all loads on the system will see their highest weekend on the same day of the month. Since some loads peak on the weekdays and some loads peak on the weekend, the different load types will peak on one of two different days, so the scaling factors must be calculated based on the curve data for different types weighted based on the percent of load on the feeder allocated to a particular type of customer.

4. SIMULATION RESULTS

Table 3 below shows loss results for load factor calculation for 8 different feeders. As we discussed

previously, loss calculation with load factor method is underestimated, so loss values are very lower than its original measurement values. Table 3 also provides extra

information to calculate losses by using load factor method and customer class statistic methods are under or overestimated with these methods.

Table 3. Load Factor Loss Calculation

Load Factor calculation						
Feeder#	MaxKWFlow	KWFlowSum	KWFlowAvg	Load Factor	LossesKWMax	LossesKW
Feeder1	4496.15	1623715.19	2255.16	0.50	81.30	14725.74
Feeder2	4312.54	2023898.59	2810.97	0.65	58.72	17961.45
Feeder3	3751.95	1322135.87	1836.30	0.49	86.72	14956.37
Feeder4	3381.83	1506666.53	2092.59	0.62	18.86	5199.40
Feeder5	6815.34	2795443.59	3882.56	0.57	139.46	32586.05
Feeder6	531.45	245696.83	341.25	0.64	2.95	875.96
Feeder7	3754.92	1619877.46	2249.83	0.60	37.49	9690.08
Feeder8	5623.38	2600546.54	3611.87	0.64	77.71	23082.48

Another way of calculation the losses is to get customer class statistics which basically dependent on accuracy of customer class curves. Table 4 shows detail calculation of losses by using customer class statistics method.

When we don't have actual measurements or AMI data, system losses needs to be calculated by different method than load factor and customer class statistic method to be able to plan for future power systems more accurately.

Table 4. Customer Class Curve Loss Calculation

Customer Class Curve Loss Calculation				
Feeder #	LossesKW	KWFlow	KVARFlow	MaxKWFlow
Feeder1	51209.86	2915378.20	627254.78	5847.75
Feeder2	22764.78	1905225.87	1154151.19	3810.41
Feeder3	17377.86	1491892.73	465625.82	2986.67
Feeder4	7937.17	1657220.31	995658.61	3311.64
Feeder5	54290.76	2650325.64	1603754.01	5293.32
Feeder6	1899.71	312417.75	189837.58	624.63
Feeder7	14785.36	1664536.00	924510.92	3324.75
Feeder8	31064.30	2192025.61	1289755.67	4385.54

Also Table 5 shows the actual measurement for losses for each feeder. Notice that losses calculated by load factor

Table 6 shows the randomized load curve method results among with power flow results. It is interesting to see that

Table 5. Actual Measurements For Losses

Measurements of losses				
Feeder #	LossesKW	KWFlow	KVARFlow	MaxKWFlow
Feeder1	34005.36	1623715.19	-383872.48	4496.15
Feeder2	24419.53	2023898.59	1206260.58	4312.54
Feeder3	27513.36	1322135.87	-1603911.28	3751.95
Feeder4	6807.19	1506666.53	894542.87	3381.83
Feeder5	56435.99	2795443.59	1666101.43	6815.34
Feeder6	1428.90	245696.83	145831.94	531.45
Feeder7	14684.76	1619877.46	962173.18	3754.92
Feeder8	32849.89	2600546.54	464311.18	5623.38

losses by calculated randomized load are between load factor method and customer class load curve method.

measurements of little use, the utility needs another means of calculating the load and losses to evaluate their

Table 6. Loss Results with Randomized Load Curve

Randomized Load Curve				
Feeder #	LossesKW	KWFlow	KVARFlow	MaxKWFlow
Feeder1	50706.68	2876338.63	597331.38	6265.69
Feeder2	22528.53	1879711.77	1138401.85	4083.04
Feeder3	17158.10	1471901.64	439409.83	3199.89
Feeder4	7828.45	1635012.71	982224.68	3547.60
Feeder5	53911.62	2615039.34	1581825.66	5671.22
Feeder6	1882.49	308235.83	187260.53	669.28
Feeder7	14639.23	1642283.51	910893.22	3561.53
Feeder8	30748.39	2162656.37	1271488.03	4699.70

Among these loss calculation technique, proposed technique provides the most accurate data when there is no measurement or AMI data. Table 7 below shows the accuracy comparison of three methods based on actual measurement values.

design decisions. In this paper, a novel method of calculating customer loads at every service location is presented. This method does not have the large measurement requirements of the more accurate methodologies but makes effective use of peak load

Table 7. Comparison of Accuracy Among Methods

Feeder #	Load factor LossesKW	Randomized Load Curve LossesKW	Average Load Curve LossesKW	Measurement LossesKW	Load factor Accuracy	Randomized Load Curve Accuracy	Customer Load Curve Accuracy
Feeder1	14725.74	50706.68	51209.86	34005.36	0.43	0.67	1.51
Feeder2	17961.45	22528.53	22764.78	24419.53	0.74	1.08	0.93
Feeder3	14956.37	17158.10	17377.86	27513.36	0.54	1.60	0.63
Feeder4	5199.40	7828.45	7937.17	6807.19	0.76	0.87	1.17
Feeder5	32586.05	53911.62	54290.76	56435.99	0.58	1.05	0.96
Feeder6	875.96	1882.49	1899.71	1428.90	0.61	0.76	1.33
Feeder7	9690.08	14639.23	14785.36	14684.76	0.66	1.00	1.01
Feeder8	23082.48	30748.39	31064.30	32849.89	0.70	1.07	0.95

As it is seen from Table 7, average accuracy with load factor method is 0.62 while accuracies are 1.01 and 1.06 with randomized load curve and customer class load curve respectively.

5. CONCLUSION

When a utility needs to evaluate the impact of a design decision on the operating costs of a feeder, they must often incorporate the impact of the design on the cost of losses on the feeder. Historically, these losses have been calculated one of three ways: (1) using a peak load calculation and the load factor method, (2) using customer class statistics normalized for a month, season, or year, or (3) using customer class statistics together with feeder measurements to reflect the variation in load every hour of the year. Some utilities are beginning to have AMI data available which allows them to significantly reduce the uncertainty of the load. When AMI data is not available and either feeder measurements are not available or else the topology and loading of the feeder have changed so as to make the feeder

measurement/estimation and customer class statistics to greatly improve the accuracy of the feeder loss calculation. In the eight feeders simulated, this novel method presented 37% improvement in loss calculation relative to using the load factor method and 4% improvement in loss calculation relative to using normalized customer load statistics.

ACKNOWLEDGEMENT

The work is supported by the project “Rastgele Yük Eğrisi metodu ile elektrik kayıplarının hesaplanması” funded by national institute AGU with project BAP with the project ID 48.

REFERENCES

- [1] Y. Liang, K. S. Tam, R. Broadwater, “Load Calibration and Model Validation Methodologies for Power Distribution Systems”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(3): 1393-1401, (2010).
- [2] L.R. Feinauer, K.J.Russell, R. Broadwater, “Graph Trace Analysis and Generic Algorithms for Interdependent

- Reconfigurable System Design and Control“, *Naval Engineers Journal*, 120(1): (2008).
- [3] D.L. Kleppinger, K.J. Russell, and R. Broadwater, “Graph trace analysis based shipboard HM&E system priority management and recovery analysis,” *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 109–114, (2007).
- [4] R. Broadwater, A. Sargent, A. Yarali, H. Shaalan, Jo Nazarko “Estimating Substation Peaks From Load Research Data” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(1): 451-456, (1997).
- [5] A. Sargent, R. P. Broadwater, J. Thompson, J. Nazarko, “Estimation of Diversity and KWHR-to-Peak-KW Factors from Load Research Data,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(3): 1450-1456, (1994).
- [6] D. Han ; J. Ma, H. Ren-mu, Z. Dong, “A Real Application of Measurement-Based Load Modeling in Large-Scale Power Grids and its Validation” *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(4): 1756-1764, (2009).
- [7] M. Dilek, Francisco de Leon, R. Broadwater, “A Robust Multi-phase Power Flow for General Distribution Networks,” *IEEE Transactions on Power Systems*, 99: 1-9, (2009) .
- [8] J.A Jardini, C.M.V. Tahan, S.U Ahn, E.L. Ferrari, “Distribution transformer loading evaluation based on load profiles measurements, *IEEE Transactions on Power Systems*, 12(4): 1766-1770, (1997).
- [9] M.W Gustafson, J.S. Baylor, “Operational losses savings attributable to load management” *IEEE Transactions on Power Systems*, 4(1): 229-235, (1989).
- [10] A. Onen “Model- Based Grid Modernization Economic Evaluation Framework”, *Ph.D. Dissertation*, Chapter 5, page 72-73, Virginia Polytechnic Institute and State University, March 2014.
- [11] A.Onen, J. Woyak, R. Broadwater, “Time-varying cost of loss evaluation in distribution networks using market marginal price” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 62: 712-717, (2014).
- [12] P.Kulkarni, S. Gormus, F. Zhong, F. Ramos, “AMI Mesh Networks—A Practical Solution and Its Performance Evaluation”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(3): 1469-1481, (2012).
- [13] D. Apetrei, D. Federenciu, D. Stanescu, “Interoperability of AMI systems”, *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED 2013)*, 1-4, 10-13 June 213, Stockholm.
- [14] T.A. Short, “Advanced Metering for Phase Identification, Transformer Identification, and Secondary Modeling”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(2): 651-658, (2013).
- [15] M.A. Rahman, E. Al-Shaer, P. Bera, “A Noninvasive Threat Analyzer for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid” , *IEEE Transactions on Smart Grid*, 4(1): 273-287, (2013).
- [16] Z. Luhua, Y. Zhonglin, W. Sitong, Y. Ruiming, Z. Hui, Y. Qingduo, “Effects of Advanced Metering Infrastructure (AMI) on relations of Power Supply and Application in smart grid”, *2010 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 13-16 Sept. 2010, pp.1-5, Nanjing.
- [17] H. L. Willis, Power distribution planning reference book, 2nd ed. New York: M. Dekker, 2004W.-K. Chen, *Linear Networks and Systems (Book style)*. Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123–135.

Adaptif Hız Kontrol (AHK) Sistemindeki Mesafe Kontrol Sisteminin Sabit Mesafe Ve Sabit Zaman Yöntemleriyle Uygulamalı Olarak Karşılaştırılması

Hasan ŞAHİN

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makine Mühendisliği, İstanbul, Türkiye
(Geliş/Received : 04.06.2016 ; Kabul/Accepted : 07.07.2016)

ÖZ

Bu çalışmada AHK sistemindeki mesafe kontrol sistemi farklı iki kontrolcü ile test edilmiştir. İlk kontrolcü mesafe kontrolünü PD algoritmasıyla araçlar arasındaki mesafeyi sabit tutmaya çalışarak sağlamıştır. İkinci kontrolcü ise Sabit Zaman Algoritması (SZA) ile mesafe kontrolünü araçlar arasındaki süreyi sabit tutmaya çalışarak sağlamıştır. MATLAB/Simulink programıyla yapılan simülasyonlar sonucunda çıkan sonuçlara göre PD algoritması ile yapılan mesafe kontrolü daha az hata ile daha konforlu geçişler sağlarken; SZA algoritması ile yapılan mesafe kontrolü daha çok hata ile daha keskin geçişler sağlamıştır. Sonuç olarak PD algoritması ile donatılan AHK sistemi daha güvenli ve konforlu bir sürüş sağlayabilir.

Anahtar Kelimeler: MATLAB/Simulink, Adaptif Kız Kontrolü, Otonom Kontrol Sistemleri, Araç Kontrol Sistemleri, Aktif Güvenlik Sistemleri.

Comparison of A Distance Controller Design Via Constant Distance And Constant Time Gap (CTG) Methods In An Adaptive Cruise Control (ACC) System

ABSTRACT

In this study, the distance control system of the ACC system was tested via two different controllers. The first controller is the PD controller which tries to keep the distance between vehicles according to the reference distance. Moreover, the second controller is the CTG controller which tries to keep the time gap between vehicles according to the reference time gap. The simulations were done via MATLAB/Simulink. Results show that the PD controller provided smoother transitions with less error however, the CTG controller provided sharper transitions with more error. Therefore, the ACC system which was developed with the PD controller could be much safer and comfortable than the CTG controller.

Keywords: MATLAB/Simulink, Adaptive Cruise Control, Autonomous Control Systems, Vehicle Control Systems, Advanced Driver Assistance Systems.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araçlardaki aktif güvenlik sistemleri yıllardır daha da gelişerek kaza önleyici ve sürücü destekleyici sistemler olarak literatürde yerini almıştır [1]. Bu sistemler kazayı engellemek adına sürücüyü destekleyerek sürücüden kaynaklanan hataları en aza indirmeye çalışmaktadır [1]. Bunların yanı sıra AHK sistemi hem konfor hem de bir güvenlik sistemidir [2]. Bu sistem aracı sürücünün belirlediği hızda sürerken aynı zamanda öndeki araçla mesafeyi de yine sürücünün belirlediği oranda ayarlayarak otomatik bir sürüş sağlamaktadır [3]. Sistem öndeki araçla olan mesafesini aracın ön kısmına yerleştirilmiş bir radar vasıtasıyla gerçek zamanlı olarak

monitör ederek sürücünün istediği mesafeyi belirlenen oranda gaz ve fren pedalının otomatik kontrolü ile gerçekleştirmektedir [4]. Mesafe kontrolü için literatürdeki bir çok algoritma kullanılabilir. Bunlardan en önemlileri bu çalışmada kullanıldığı üzere SZA ve PD algoritmalarıdır [5]. AHK sistemindeki mesafe kontrolünün devreye girmesi için öndeki araçla mesafenin sürücü tarafından belirlenen değerden daha az olması gerekir [6]. Eğer mesafe sürücü tarafından belirlenen değerden fazlaysa AHK sistemindeki mesafe kontrolü yerine hız kontrolü devredir [6]. Hız kontrolü sürücünün belirlediği hıza ulaşana kadar aracı otomatik olarak hızlandırır ve aracı o hızda sabit tutmaya çalışır [6]. Bu durumda aracın önüne başka bir araç çıkarsa ve bu araçla olan mesafe sürücü tarafından belirlenen mesafeden az olursa hız kontrolü devreden çıkar ve mesafe kontrolü devreye girer [6]. Bu çalışmada hız

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: sahinhasan@itu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 205-210

kontrolü olarak PI algoritması seçilmiştir. Hız kontrolü ile mesafe kontrolü arasındaki geçişi AHK sistemi kodlandığı şekilde otomatik olarak gerçekleştirmektedir.

Bu çalışmanın simülasyonu MATLAB/Simulink üzerinde herhangi bir katılımcı olmaksızın yapılmıştır. Katılımcılarla yapılabilecek bir deneyde AHK sisteminin sürücüler üzerine etkisi de gözlemlenebilir [7]. Bu sistemin bir araca entegre edilmesinin olası en önemli avantajı ise sistemin reaksiyon zamanının insanın reaksiyon zamanından daha kısa olmasıdır [8]. Böylelikle sürüş güvenirliliği de artmış olacaktır [9]. Örnek vermek gerekirse AHK sistemi içermeyen bir araçla AHK sistemini içeren bir araç kıyaslanabilir. AHK sistemini içermeyen araçla seyreden bir sürücünün önüne aniden bir araç çıktığında sürücü profesyonel bir sürücü dahi olsa reaksiyon zamanı yüzünden fren pedalını aktif hale getirmesi AHK sistemi içeren bir araca göre daha geç olacaktır. Bu sebeple de olası bir kazayı engelleme şansı daha az olacaktır [9]. Bunun yanı sıra AHK sistemi içeren bir çok araçla bir araç konvoyu yaratılabilir. Bu konvoydaki araçların birbiriyle bağlantıları belirlenen bir ses dalgası ile sağlanarak araçlar arasındaki mesafe istenilen oranda hatasız sağlanabilir [10].

Bu çalışmada tek bir araca AHK sistemi entegre edilerek bu aracın önündeki araçla olan mesafe kontrolü iki farklı algoritmayla kıyaslanarak yapılmıştır. Bu algoritmalar PD ve SZA algoritmalarıdır. Bu algoritmaların içeriği bir sonraki bölümde detaylı olarak açıklanacaktır. Yapılan simülasyonlardan elde edilen sonuçlara göre PD algoritması ile yapılan mesafe kontrolü daha az hata ile daha konforlu geçişler sağlarken; SZA algoritması ile yapılan mesafe kontrolü daha çok hata ile daha keskin geçişler sağlamıştır.

2. DENEY YÖNTEMİ (METHOD)

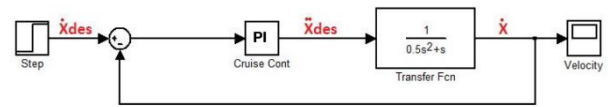
Daha önce bahsedildiği üzere AHK sistemi hız kontrolü ve mesafe kontrolü olmak üzere iki farklı kontrol sistemini içermektedir. Bu çalışmada mesafe kontrolüne odaklanılmış olsa da hız kontrolü olmadan AHK sistemi düşünülemez. Dolayısıyla deney yönetiminde hız kontrolü ve mesafe kontrolü detaylı olarak açıklanacaktır.

Taşıt modeli ise üst ve alt kontrol modeli olmak üzere iki modele ayrılmıştır. Modeller [3] nolu kaynaktan referans alınarak tasarlanmıştır. Üst kontrol modelinde taşıtın istenen hıza ulaşması için gerekli olan anlık ivme değeri hesaplanmıştır. Bu makalenin amacı farklı algoritmalarla bu anlık ivme değerini en sağlıklı şekilde belirlemeye çalışmaktır. Alt kontrol modelinde ise belirlenen bu anlık ivmeyi sağlamak için taşıt parametreleri göz önünde bulundurularak gerekli olan motor torku hesaplanmaktadır. Taşıttın tüm özelliklerideğişse bile bu değişiklikler motor torku değiştirilerek tolere edilebilir. Bu makaledeki tüm simülasyonlar taşıtın sadece üst kontrol modeli kullanılarak yapılmıştır. Motor torkunu kontrol etmek ayrı bir çalışma konusudur. Dolayısıyla bu makalede vurgulanan üst kontrol modelindeki ivme çıktısını doğru bir şekilde kontrol edebilmektir. Taşıtın

üst kontrol modeli PI,PD ve SZA algoritmalarının açıklandığı bölümlerde detaylı olarak yer almaktadır. Alt kontrol modelinde ise 1 numaralı denklemde görüldüğü üzere T_{net} motorun net yanma torkunu, J_e motorun efektif atalet katsayısını, R çevrim oranını, \ddot{x}_{des} üst kontrol modelinde hesaplanan taşıt için anlık istenen ivme değerini, r_{eff} efektif lastik yarıçapını, c_a aerodinamik hava katsayısını ve ω_e motorun açısal hızını göstermektedir. Buradaki anlık ivme değeri belirtildiği üzere üst kontrol modelinden gelmektedir. Ona göre de gerekli olan motor torku ayarlanabilir.

$$T_{net} = \frac{J_e}{R r_{eff}} \ddot{x}_{des} + [c_a R^3 r_{eff}^3 \omega_e^2 + R(r_{eff} R_x)] \quad (1)$$

2.1 PI algoritmasıyla hız kontrolü



Şekil 1. PI algoritmasıyla hız kontrol sistemi (Cruise Control System via PI Controller)

PI algoritması oransal ve integral denetleyici PID kontrol döngüsü yönteminin kısaltması olarak verilmiştir. PI algoritmasıyla hız kontrolü yapılacak olan taşıtın üst kontrol modeli 2 numaralı denklemde gösterilmiştir. Bu denklemde PI algoritması kullanılarak taşıta uygulanması gereken doğrusal ivme \ddot{x}_{des} hesaplanmaktadır. k_p değeri oransal katsayıyı, k_i değeri ise integral katsayısını göstermektedir. V_x taşıtın gerçek hızı ve V_{ref} ise taşıtın olması gereken hızıdır. 3 numaralı denklemde 2 numaralı denklemin basitleştirilmiş hali görülmektedir.

$$\ddot{x}_{des}(t) = -k_p(V_x - V_{ref}) - k_i \int_0^t (V_x - V_{ref}) dt \quad (2)$$

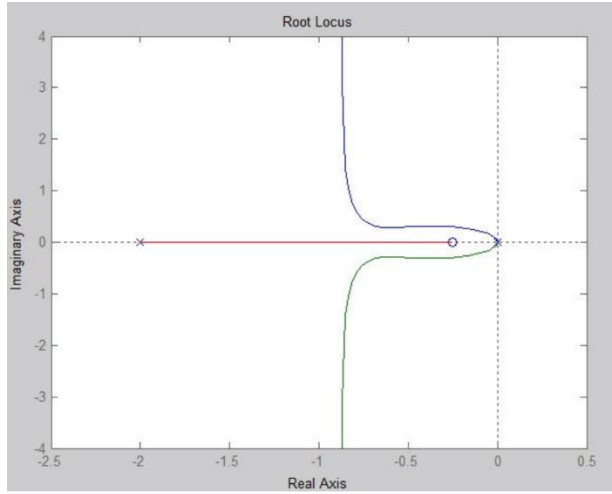
$$\ddot{x}_{des} = -k_p(\dot{x} - \dot{x}_{des}) - k_i(x - x_{des}) \quad (3)$$

Bu denklemlerle yapılan kapalı çevrim kontrol modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Kapalı çevrim modelinde 2.dereceden bir transfer fonksiyon bulunmaktadır. Bu fonksiyon 4 numaralı denklemde gösterilmiştir. Bu denklemdeki τ değeri simülasyondaki gecikme süresini saniye cinsinden temsil etmektedir.

$$P(s) = \frac{1}{s(\tau s + 1)} \quad (4)$$

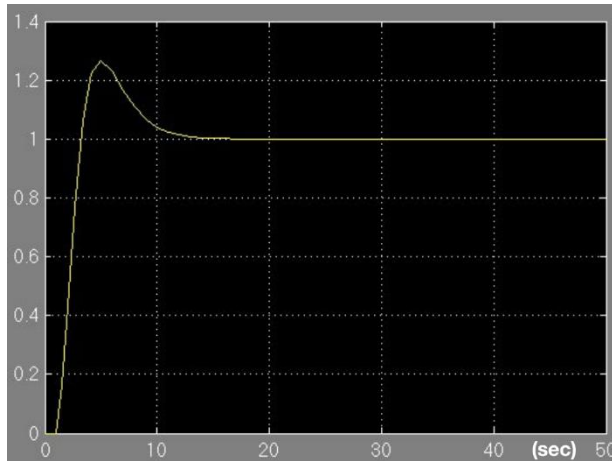
Dolayısıyla Şekil 1'de gösterildiği üzere bu transfer fonksiyon sisteminde 0.5 saniyelik bir gecikme süresi olacak şekilde kontrolcü tarafından belirlenen ivmeyi hıza dönüştürecek şekilde tasarlanmıştır [3]. Olası gecikme süresi sistemin reaksiyon zamanı olarak da kabul edilebilir [3]. Transfer fonksiyonun çıktısı aracın gerçek hızıdır. Bu hızla hız kontrol sistemine sürücü tarafından girilen referans hız arasındaki fark PI algoritmasıyla kontrol edilerek transfer fonksiyona ivme çıktısı olarak iletilmektedir. Şekil 1'de referans hız olarak bir basamak fonksiyonu tanımlanmıştır. Hız kontrolü içerisindeki PI algoritmasına ait katsayılar "Köklerinin

Yer Eğrisi Çizimi” yöntemiyle hesaplanarak seçilmiştir [3,11]. Hız kontrol sisteminin kapalı çevrim modelinin “Köklerinin Yer Eğrisi Çizim” yöntemiyle çizilen grafiği Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. PI algoritması köklerinin yer eğrisi çizimi (Root Locus Plot of PI controller closed loop transfer function)

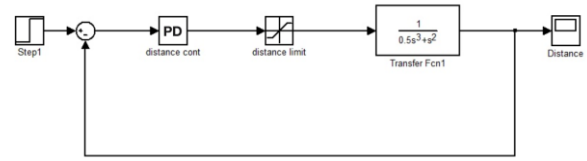
Şekil 2’deki grafiğe göre PI algoritmasındaki I değeri 0.1875 ve P değeri 0.75 olarak belirlenmiştir [3,11]. Tasarlanan hız kontrol sisteminin basamak fonksiyonu cevabı ise Şekil 3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. PI algoritması basamak fonksiyonu cevabı(Step response of PI controller)

Şekil 3’de görüldüğü üzere sistemin basamak fonksiyon cevabında 25% oranında taşma meydana gelmiştir. Bu taşma iyileştirilebilir, ancak hız kontrol sisteminin tasarımı [3] nolu kaynaktan bir örnek olarak düzenleme yapılmadan alınmıştır. Bu çalışmanın amacı hız kontrol sisteminin tasarımını iyileştirmek değildir. Daha önce belirtildiği üzere çalışmanın asıl amacı mesafe kontrol sisteminin hassas tasarımı ve uygulamasıdır. Dolayısıyla hız kontrol sistemi değiştirilmeden belirtilen kaynaktan alınarak AHK sistemine eklenmiştir.

2.2 PD algoritmasıyla mesafe kontrolü



Şekil 4. PD algoritması ile mesafe kontrolü (Distance Control via PD Controller)

PD algoritması oransal ve türevsel denetleyici PID kontrol döngüsü yönteminin kısaltması olarak verilmiştir. PD algoritmasıyla mesafe kontrolü yapılacak olan taşıtın üst kontrol modeli 5 numaralı denklemde gösterilmiştir. Bu denklemde PD algoritması kullanılarak taşıta uygulanması gereken doğrusal ivme \ddot{x}_{des} hesaplanmaktadır. k_p değeri oransal katsayıyı, k_d değeri ise türevsel katsayıyı göstermektedir. x taşıtın anlık aldığı mesafe ve x_{des} ise taşıtın anlık alması gereken mesafedir.

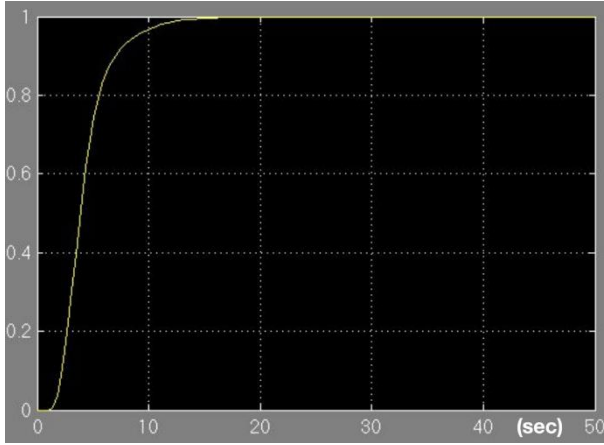
$$\ddot{x}_{des} = -k_p(x - x_{des}) - k_d(\dot{x} - \dot{x}_{des}) \quad (5)$$

Bu denklemle yapılan kapalı çevrim kontrol modeli Şekil 4’te gösterilmiştir. Kapalı çevrim modelinde 3.dereceden bir transfer fonksiyon bulunmaktadır. Bu fonksiyon 6 numaralı denklemde gösterilmiştir. Bu denklemdeki τ değeri simülasyondaki gecikme süresini saniye cinsinden temsil etmektedir.

$$P(s) = \frac{1}{s^2(\tau s + 1)} \quad (6)$$

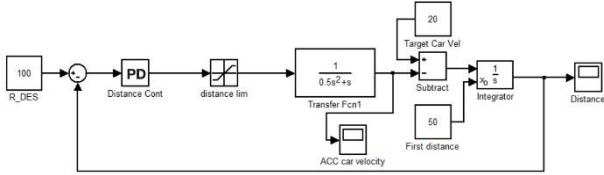
Dolayısıyla Şekil 4’te görüldüğü üzere bu transfer fonksiyon sistemde yine 0.5 saniyelik bir gecikme süresi olacak şekilde kontrolcü tarafından belirlenen ivmeyi mesafeye dönüştürecek şekilde tasarlanmıştır [3]. Transfer fonksiyonun çıktısı öndeki araçla olan gerçek mesafeyi göstermektedir. Bu mesafeyle mesafe kontrol sistemine sürücü tarafından girilen referans mesafe arasındaki fark PD algoritmasıyla kontrol edilerek transfer fonksiyona ivme çıktısı olarak iletilmektedir. Bununla birlikte PD algoritması ile transfer fonksiyonu arasında aracın üst ve alt ivmelenme değerleri belirlenmiştir. Buna göre araç hızlanırken üst ivmelenme limiti 1.0 m/s^2 ve araç yavaşlarken alt ivmelenme limiti -2.5 m/s^2 dir. Bu değerler araç hızlanırken ve yavaşlarken sürücü konforunu sarsmayacak şekilde belirlenmiştir [3]. Şekil 4’te referans mesafe olarak bir basamak fonksiyonu tanımlanmıştır [3]. Mesafe kontrolü içerisindeki PD algoritmasına ait katsayılar yine “Köklerinin Yer Eğrisi Çizimi” yöntemiyle hesaplanarak seçilmiştir [3,11]. Bu yöntemle yapılan özgün tasarımda PD algoritmasındaki D değeri 0.9495 ve P değeri 0.284 olarak belirlenmiştir.

Şekil 5’te görüldüğü üzere sistemin basamak fonksiyon cevabında sistem integral içermediği için herhangi bir



Şekil 5. PD algoritması basamak fonksiyonu cevabı (Step response of PD controller)

taşma görülmektedir. PD algoritmasıyla yapılan mesafe kontrol sistemi ise Şekil 6’da görülmektedir.

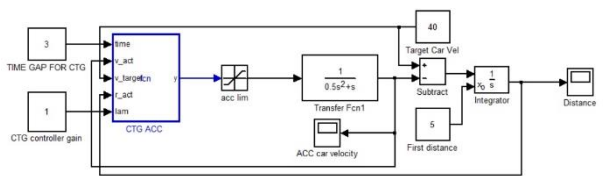


Şekil 6. PD algoritmasıyla mesafe kontrol sistemi (Distance Control System via PD controller)

Şekil 6’da Şekil 4’e ek olarak öndeki aracın hızı başlangıç anında ve simülasyon boyunca 20 m/s ve öndeki araçla olan başlangıç mesafesi ise 50 metre olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte sürücü tarafından öndeki araçla olan referans mesafesi de 100 metre olarak tanımlanmıştır. Mesafe kontrolü yüklü olan ana aracın simülasyon başladığı ilk andaki hızı 0 m/s dir. Simülasyon sonucu ilerleyen bölümlerde gösterilerek tartışılacaktır.

2.3 SZA algoritmasıyla mesafe kontrolü

Şekil 7’de görüldüğü üzere Şekil 6 ile kıyaslandığında PD algoritmasının yerini SZA algoritması almıştır. Şekil 7’de mavi kutucukla gösterilen SZA algoritmasının MATLAB içerisine yüklenmiş kodu ise Çizelge 1’de görülmektedir. “%” işareti içeren satırlar formül açıklamalarıdır. Çizelge 1’deki ilk satır ise SZA algoritmasının temel formülünü göstermektedir [3]. Bu temel formül bir kaç formülün birleşmesinden oluşmaktadır.



Şekil 7. SZA algoritmasıyla mesafe kontrol sistemi (Distance Control System via CTG controller)

Çizelge 1. SZA algoritmasının MATLAB/Simulink içerisine yüklenmiş kodu (The code of CTG controller)

```

Y = (-1/time) * [(V1- V2) + [L* (-D + (time*V1))]] ;
% Y = SZA algoritması tarafından hesaplanan ivme
değeri (m/s2)
% time = Sürücünün belirlediği öndeki araçla olan süre
farkı (s)
% V1 = Mesafe kontrol sistemi yüklü olan aracın
gerçek hızı (m/s)
% V2 = Öndeki aracın gerçek hızı (m/s)
% D = Öndeki araçla olan gerçek mesafe (m)
% L = SZA algoritması hassasiyet katsayısı (1/s)
    
```

Çizelge 1’deki temel formül çıktısı aracın doğrusal yönde istenilen ivmesidir. SZA algoritmasında PD algoritmasına göre araçlar arası istenilen mesafe sabit değildir ve hıza bağlı olarak 7 numaralı denklemde gösterildiği üzere değiştirmektedir. h araçlar arası istenilen süre farkını, V_x ise mesafe kontrol yüklü olan aracın gerçek hızını göstermektedir.

$$\partial_{i_{des}} = hV_x \quad (7)$$

Çizelge 1’deki temel formülde gösterilen $(V1-V2)$ ifadesi 8 numaralı denklemde gösterilen ∂_i ifadesinin türevinden gelmektedir. ∂_i araçlar arası mesafe farkının türevi olarak araçlar arası hız farkını göstermektedir. Yine Çizelge 1’deki temel formülde gösterilen $(-D + (time*V1))$ ifadesi ise 8 numaralı denklemde belirtilen araçlar arası mesafe hatasını φ_i göstermektedir.

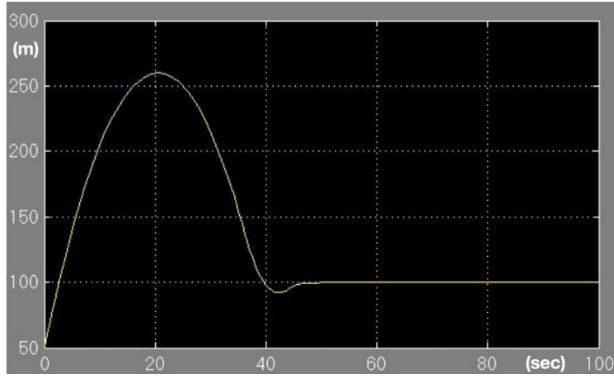
$$\varphi_i = -\partial_i + hV_x \quad (8)$$

7 ve 8 numaralı denklemler birleştirildiğinde Çizelge 1’deki temel formül elde edilmektedir [3]. Şekil 7’de ve Çizelge 1’de belirtildiği üzere SZA algoritması hassasiyet katsayısı 1; sürücü tarafından belirlenen öndeki araçla olan süre farkı 3 saniye; mesafe kontrol sistemi yüklü olan aracın ilk hızı 0 m/s; öndeki aracın başlangıç anından sonra simülasyon boyunca hızı 40 m/s ve öndeki araçla olan başlangıç mesafesi ise 5 metre olarak tanımlanmıştır. SZA algoritması da PD algoritması gibi bir kapalı çevrim sistemine sahiptir. PD algoritmasındaki

kapalı çevrimde sadece mesafe farkları kullanılırken; SZA algoritmasındaki kapalı çevrimde mesafe kontrol sistemi yüklü aracın gerçek hızı, öndeki araçla olan gerçek mesafesi ve öndeki aracın gerçek hızı kullanılmıştır. Bununla birlikte SZA algoritması ile transfer fonksiyonu arasında PD algoritmasında olduğu gibi aracın üst ve alt ivmelenme değerleri belirlenmiştir. Buna göre araç hızlanırken üst ivmelenme limiti yine 1.0 m/s^2 ve araç yavaşlarken alt ivmelenme limiti -2.5 m/s^2 dir. PD ve SZA algoritmalarının simülasyon sonuçları bir

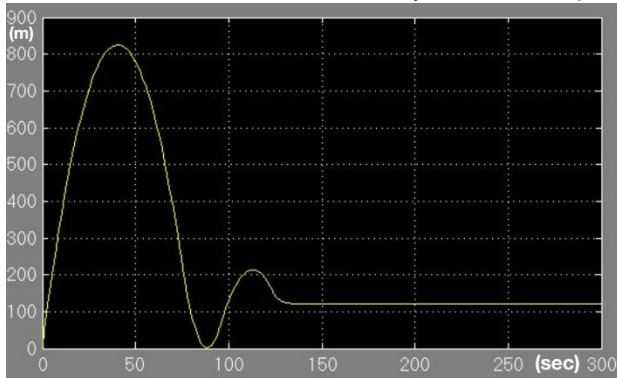
sonraki bölümde gösterilip detaylı biçimde kıyaslanacaktır.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)



Şekil 8. PD algoritması ile donatılan mesafe kontrol sisteminin sağladığı mesafe değişimi (The distance between vehicles provided by the distance control system via PD controller)

İlk olarak PD algoritması sonuçları incelenecek olursa Şekil 8'de görüldüğü üzere simülasyon başlangıç anında araçlar arası mesafe 50 metredir. Sonrasında mesafe kontrol sistemi yüklü araç hızlanarak öndeki aracın hızını 20. saniyede (20 m/s) yakalamıştır. Sonrasında araçlar arasındaki mesafe referans değer olan 100 metreye gelinceye kadar mesafe kontrol sistemi yüklü araç hızlanmaya devam etmiştir. Araçlar arası mesafe 100 metreye geldiğinde mesafe kontrol sistemi yüklü araç yavaşlamaya başlamış ve sonrasında araçlar arası mesafe 92 metreye geldiğinde öndeki aracın hızını yakalamıştır. Sonrasında hızlanıp yavaşlayarak öndeki araçla mesafesini 100 metre olarak korumaya devam etmiştir.



Buradaki hata payı 8 metre olarak ölçülerek referans olarak belirlenen mesafenin 8% 'idir.

Şekil 9. SZA algoritması ile donatılan mesafe kontrol sisteminin sağladığı mesafe değişimi (The distance between vehicles provided by the distance control system via CTG controller)

SZA algoritması sonuçları incelenecek olursa Şekil 9'da görüldüğü üzere simülasyon başlangıç anında araçlar arası mesafe 5 metredir. Sonrasında mesafe kontrol sistemi yüklü araç hızlanarak öndeki aracın hızını 40.

saniyede (40 m/s) yakalamıştır. Sonrasında araçlar arasındaki mesafe referans değer olan 3 saniyeye yani 120 metreye gelinceye kadar mesafe kontrol sistemi yüklü araç hızlanmaya devam etmiştir. Araçlar arası mesafe 120 metreye geldiğinde mesafe kontrol sistemi yüklü araç yavaşlamaya başlamış ve sonrasında araçlar arası mesafe yaklaşık 1 metreye geldiğinde öndeki aracın hızını yakalamıştır. Sonrasında hızlanıp yavaşlayarak öndeki araçla mesafesini 120 metre olarak korumaya devam etmiştir. Buradaki hata payı yaklaşık 119 metre olarak ölçülerek referans olarak belirlenen mesafenin 99% 'u yani neredeyse tamamı kadardır. Bu sonuç neredeyse bir kazaya yol açacak şekilde meydana geldiğinden asla kabul edilemez. SZA algoritmasının hassasiyet değeri tavsiye edilen değere yakın bir değer alınmıştır [3]. Hassasiyet değeri ne kadar değiştirilse de PD algoritmasının sağladığı 8% 'lik hata payına yaklaşamamıştır. Dolayısıyla ilk bakışta bu sonuçlara göre mesafe kontrol sisteminde PD algoritması tercih edilebilir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada AHK sistemindeki mesafe kontrol sistemi PD ve SZA algoritmalarıyla denenmiş ve hata oranları karşılaştırılmıştır. Çıkan sonuçlara göre otomatik pilot olarak kullanılan PD algoritmasıyla donatılan mesafe kontrol sisteminin davranışı insan davranışına çok benzer olduğundan bu algoritma tercih edilebilir [12]. Diğer bir yandan SZA algoritmasındaki hata payı çok yüksek olduğundan ve neredeyse bir kazaya sebep olacağından bu algoritmanın kontrol modeli değiştirilmeden otomatik pilot olarak kullanılamaz.

PD algoritmasında sürücü öndeki araçla olan referans mesafeyi metre cinsinden belirlerken; SZA algoritmasında saniye cinsinden belirlemektedir. Günümüzde AHK sistemlerinde sürücü öndeki araçla olan referans mesafeyi saniye cinsinden belirlemektedir. Araç hızlarının değişken olduğu düşünülürse bunun saniye olarak belirlenmesi çok daha mantıklıdır. Ancak bu durumda PD algoritmasının kullanılması pratik olarak mümkün değildir. Dolayısıyla gelecek çalışmalarda yapılması gereken SZA algoritmasının kontrol modelinin düzenlenerek PD algoritması gibi çalışmasını sağlamaktır. Sürücüye destek olan bu otonom sistemlerin tasarımında insanın reaksiyon zamanı da baz alınırsa sürücüyle beraber daha verimli bir sistem ortaya çıkacaktır [13,14].

KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

ACC	Adaptive Cruise Control
CTG	Constant Time Gap
PD	Proportional-Derivative
PI	Proportional-Integral
PID	Proportional-Integral-Derivative
SZA	Sabit Zaman Algoritması
AHK	Adaptif Hız Kontrol
T_{ne}	Motorun net yanma torku

J_e r_{eff}	Motorun efektif atalet katsayısı Etkifatif lastik yarıçapı
F \ddot{x}_{des} \dot{x}_{des} x θ_{ides} θ $\dot{\theta}$ c_a ω_e k_p k_i k_c V_x, \dot{x} V_{ref}, \dot{x}_{des} h φ	Çevrim oranı Taşıtın olması gereken doğrusal ivmesi Taşıtın anlık alması gereken mesafesi Taşıtın anlık aldığı mesafe Öndeki taşıtla istenen mesafe farkı Öndeki taşıtla gerçek mesafe farkı Öndeki taşıtla gerçek hız farkı Aerodinamik hava katsayısı Motorun açısal hızı PID oransal katsayısı PID integral katsayısı PID türevsel katsayısı Taşıtın gerçek hızı Taşıtın olması gereken hızı Öndeki taşıtla istenilen süre farkı Öndeki taşıtla mesafe farkı hatası

Technology, Planning, and Operations, 16:1, 36-44, (2012).

- [9] Wang J., Zhang L., Zhang D. and Li K. "An Adaptive Longitudinal Driving Assistance System Based on Driver Characteristics". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(1), (2013).
- [10] Milanés V., Shladover S., Spring J., Nowakowski C., Kawazoe H. and Nakamura M. "Cooperative Adaptive Cruise Control in Real Traffic Situations". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(1): (2014).
- [11] Franklin G., Powell J. and Naeini A. "Feedback Control of Dynamic Systems", *Pearson*, (2006).
- [12] Moon S. and Yi K. "Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm". *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 46(8): 661-690, (2008).
- [13] Lee D., McGehee V., Brown L. and Reyes L. "Collision warning timing, driver distraction, and driver response to imminent rear-end collisions in a high-fidelity driving simulator". *Human Factors*, 44: 314-335, (2002).
- [14] Itoh M., Horikome T. and Inagaki T. "Effectiveness and driver acceptance of a semi- autonomous forward obstacle collision avoidance system". *In Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 54th annual meeting* (pp. 2091-2095). Santa Monica, CA, (2010).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Thierry P., Kassaagi M. and Brissart G. "Active Safety Experiments with Common Drivers for the Specification of Active Safety Systems", 2001-06-0004. *Society of Automotive Engineers*, (2001).
- [2] Tapani A. "Traffic simulation modelling of driver assistance systems". *Advances in Transportation Studies an international Journal, Section A* 23: (2011).
- [3] Rajamani R. "Vehicle Dynamics & Control". New York, USA: *Springer*, (2006).
- [4] Bauer H. "Automotive Handbook: 7th Edition". Chichester, England: *Wiley. Robert Bosch GmbH*, (2007).
- [5] Ali Z., Popov A. and Charles G. "Model predictive control with constraints for a nonlinear adaptive cruise control vehicle model in transition manoeuvres". *Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, 51:6, 943-963, (2013).
- [6] Bauer H. "AHK Adaptive Cruise Control". *Robert Bosch GmbH*, (2003).
- [7] Xiong H. and Boyle L. "Drivers' Adaptation to Adaptive Cruise Control: Examination of Automatic and Manual Braking". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(3): (2012).
- [8] Tapani A. "Vehicle Trajectory Effects of Adaptive Cruise Control", *Journal of Intelligent Transportation Systems:*

Farklı Akışkanlarda Değişken Soğutucu Akışkan Debili Sistemin (VRF) Enerji ve Ekserji Analizlerinin Karşılaştırılması

Ali İbrahim ATILGAN, Utku TÜRKMEN*

Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
(Geliş/Received : 10.05.2016 ; Kabul/Accepted : 07.07.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, termodinamik kanunlarına genel bir giriş yapılmış ve değişken soğutucu akışkan debili sistemler incelenmiştir. Ayrıca, örnek bir değişken soğutucu akışkan debili sistemin termodinamik analizi yapılmış, farklı çalışma koşullarında ve farklı soğutucu akışkanlar kullanılması durumlarında sistemin ekserji kayıpları karşılaştırılmıştır. Sistemin eş zamanlı ısıtma-soğutma yapma koşulunda en düşük soğutucu akışkan debisi gerçekleşirken, yalnız soğutma yapma koşulunda en yüksek soğutucu akışkan debisi gerçekleşmiştir. Entropi oluşumları ve ekserji kayıpları incelendiğinde, eş zamanlı ısıtma-soğutma yapma koşulunda en düşük entropi oluşumu ve ekserji kaybı meydana gelmiştir. Yalnız soğutma yapma koşulunda ise, en yüksek entropi oluşumu ve ekserji kaybı gerçekleşmiştir. Soğutucu akışkanlar karşılaştırıldığında ise, R404 soğutucu akışkanı kullanıldığında en düşük ekserji kaybı gerçekleşmiştir. En yüksek ekserji kaybı ise R410A soğutucu akışkanı kullanıldığında meydana gelmiştir. Bu çalışma ile konuya yönelik bilinçlenmenin artırılması amaçlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Değişken Debi, Termodinamik Analiz, Soğutucu Akışkan.

Comparison of Energy and Exergy Analysis for Variable Refrigerant Flow System (VRF) with Different Refrigerants

ABSTRACT

In this study, an overview of laws of thermodynamics and variable refrigerant flow systems have been investigated. Besides, thermodynamic analysis of a sample variable refrigerant flow system has been evaluated and exergy losses of different working conditions and different refrigerants has been compared. While minimum refrigerant mass flow rate has been occurred in simultaneous heating-cooling working condition of the system, maximum refrigerant mass flow rate has been occurred in only cooling working condition. When entropy generations and exergy losses analyzed, minimum entropy generations and exergy losses has been appeared in simultaneous heating-cooling working condition. Maximum entropy generations and exergy losses has been appeared in only cooling working condition. When refrigerants are compared, minimum exergy losses has been occurred in using refrigerant R404. Maximum exergy losses has been occurred in using refrigerant R410A. With this study, it has been intended to increase the awareness of the subject.

Keywords: Variable Rate, Thermodynamics Analysis, Refrigerant.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

4 adet iç üniteden oluşan bir VRF sisteminde, iç üniteler soğutucu boruları ile paralel bir şekilde dış üniteye bağlanmaktadır. Dış üniteye 4 yollu vana bağlantısı ile soğutucu akışkan yönü değiştirilebilir ve bu özellik sayesinde VRF Sistemi hem soğutma sistemi hem de ısı pompası olarak kullanılabilir.

Soğutma modunda, kompresörden çıkan soğutucu akışkan dış ünite eşanjörüne (kondenser olarak kullanılır) girerek 4 yollu vanaya doğru gider. Yüksek basınç düşük sıcaklıktaki soğutucu akışkanın, EEV (Elektronik Genleşme Valfi) vasıtası ile basıncı düşer ve iç ünite

eşanjörüne (buharlaştırıcı olarak kullanılır) girer. Bunun sonucunda iç ünite bölgeden ısı çeker ve bölgeyi soğutur. Dana sonra düşük basınçlı kızgın soğutucu akışkan kompresöre döner ve döngü tamamlanır.

Isıtma modunda ise, 4 yollu vana soğutucu akışkan yönünü tersine çevirir. Soğutucu akışkan kompresörden iç ünite eşanjörüne (kondenser olarak kullanılır) girer. İç ünite ısıyı dışarı verir ve bölgeyi ısıtır. Daha sonra, yüksek basınç düşük sıcaklıktaki soğutucu akışkanın basıncı EEV vasıtası ile düşürülür. Düşük sıcaklıktaki soğutucu akışkan dış ünite eşanjörüne (buharlaştırıcı olarak kullanılır) girer. Düşük basınçlı kızgın soğutucu akışkan kompresöre döner ve döngü tamamlanır.

Çok yönlü VRF Sistemleri dış üniteleri biri değişken hızlı olmak üzere iki veya üç adet kompresörden oluşur. VRF

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: uuturkmen@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 211-222

sistemlerindeki inverter sürücülü kompresörler geniş frekans aralığında çalışır. İnverter frekansı genel olarak 20-30 Hz ile 105-120 Hz aralığındadır. [1,2]

VRF sistemlerinin en önemli dezavantajlarından biri maliyetidir. Ancak VRF sistemlerinin maliyeti uygulamaya ve bina planına bağlıdır. Ayrıca VRF sistemlerinin havalandırma kapasitesi bulunmadığından ayrı bir havalandırma sistemi gerekmesi de maliyeti artırmaktadır. [1,2]

VRF Sistemlerinin iç üniteleri genellikle, eşanjör, elektronik genişleme valfi, sıcaklık sensörü ve fanndan oluşur. İlk zamanlar 1-2 iç ünite bir dış üniteye bağlanırken, 1980'lerin sonunda 4-8 iç ünite, 1990'larda 16 iç ünite, 1999'da 32 iç ünite, 2003'te 40 ünite bir adet dış üniteye bağlanabilmektedir. Günümüzde ise 60 ve daha fazla iç ünite tek bir dış ünite ile kontrol edilebilmektedir.[3]

Farklı konfor şartları sunabildiği için çok yönlü VRF sistemleri okullarda, otellerde, ofis binalarında vb. uygulanması çok uygundur. Ayrıca hastaneler, bölgeler arası hava karışımını engellemesi nedeni ile VRF sistemleri için iyi müşterilerdir. Bankalar, kanal sisteminin çıkış yollarının küçük çapta olması sebebiyle, güvenlik açısından sistemi desteklemektedir. Sistem lüks evlerde veya birden çok ailenin yaşadığı konutlarda da kullanılabilir. Ayrıca, tarihi binalarda çok yönlü VRF sistemlerinden de faydalanmaktadır. [3]

2003 mali yılında başlıca VRF üreticilerinden bir tanesi dünya çapında 85500 adet VRF ürünü satmıştır: %69'u Asya'da, (%46,8 Japonya, %22,2 Çin) %21,9'u Avrupa'da, %6,3'ü Okyanusya'da ve sadece %2,8'i Dünya'nın geri kalanında, bu veriler Amerika'daki pazarın sınırlı olduğunu göstermektedir. [3]

VRF sistemlerinin toplam maliyeti aynı kapasitedeki chiller su soğutma grubundan %5-20 daha yüksektir. VRF sistemlerinin maliyeti tek kanallı soğutma sistemlerinden %30-50 daha fazladır. Bir VRF sistemi üreticisi 1998 yılında İtalya'da, 7 tanesi VRF sistemi kullanan 7 tanesi de chiller/boiler sistemi kullanan 14 binayı ilk yatırım maliyeti ve işletme giderlerini kıyaslamak amacıyla incelemiştir. Nemli, astropikal iklimde ve çalışma yapılan periyotta, VRF sistemlerinin %35 daha az enerji tükettiği, %40 daha az bakım-onarım maliyeti çıkardığı görülmüştür. Ancak, donanım maliyeti VRF sistemlerinde chiller/boiler sistemlerine göre yüksek çıkmıştır. 200 tonluk bir soğutma sistemi için VRF sistemleri, chiller grubu sistemlerine göre %30-40 enerji tasarrufu sağlamıştır. Ancak VRF sistemlerinde kurulum maliyeti chiller su soğutma grubuna göre %8, chiller hava soğutma grubuna göre %16 daha fazladır. Enerji kullanımı ve kurulum maliyeti birlikte hesaplandığında, VRF sistemlerinin yatırım geri dönüş süresi, hava soğutmalı sistemlerde 16 ay, su soğutmalı sistemlerde 8 ay olarak gerçekleşmiştir.[3]

Aynur, VRF sistemleri ile ilgili çalışmalarını içeren bir literatür çalışması yapmış, sistemin yapısı, iç ünite ve dış ünitelerin konfigürasyonu ile ilgili detaylı bir inceleme ortaya koymuştur. [4]

Park ve Kim, iç ünite yüklerini ve kompresör hızını değiştirerek, iki iç üniteli birbirinden ayrı EEV bulunan çok yönlü VRF sisteminin performansının ölçülmesi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, iç üniteler için kızgın buhar sıcaklık değerinin EEV ayarı yapılarak 4°C'de tutulması ve kompresör hızının her bir iç ünite için yeterli soğutma kapasitesini sağlayacak şekilde ayarlanması gerektiği ortaya konmuştur. [5]

Xia, 5 adet iç üniteli çok yönlü 3 borulu VRF sistemi için bir deney sistemi geliştirmiştir. Bu test, iç üniteler ve dış ünite bulunan 6 adet kalorimetre ile gerçekleştirilmiştir. COP değeri, sistemin toplam ısı yükünün, tükettiği toplam enerjiye oranına eşittir. İki kompresörün tandem olarak kullanılmasının, performans değerini artırdığı tespit edilmiştir. [6]

Masuda, iki iç üniteli çok yönlü VRF sistemi için bir kontrol metodu geliştirmiştir. Bu yeni kontrol metodu, yüksek soğutma yükü olan odada kurulan iç üniteye soğutucu akışkan debisinin değerini göre daha fazla olduğunu göstermektedir. Bu metod oda sıcaklığının istenilen sıcaklığa geldiğinde kompresör frekansının azalmasını veya tersi durumda yükselmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, yeni kontrol metodu ile iç ünitelerdeki soğutucu akışkan debisinin birbirinden bağımsız şekilde kontrol edebilmesi mümkün olmaktadır. [7]

Hai, 30 kW anma kapasiteli 3 borulu çok yönlü VRF sistemi üzerine çalışmıştır. Sistem, R22 soğutucu akışkanı kullanılan ve hepsi farklı kapasitede 5 iç üniteye sahip bir sistemdir. Deneysel çalışmalar sonucu, kararlı şartlar altında sistemin COP değerlerinin eşzamanlı ısıtma-soğutma modunda yüksek olduğu ortaya konmuştur. [8]

Hava soğutmalı VRF sistemleri ortamdaki hava ile soğutulurken, su soğutmalı sistemler ise su ile soğutulur. Su soğutmalı sistemlerde plaka tipi ısı değiştiricisi mevcutken, hava soğutmalı sistemlerde yüzgeçli tip ısı değiştiricisi kullanılmaktadır. Hava soğutmalı VRF sistemlerinde olduğu gibi su soğutmalı sistemlerde de birden çok iç ünite bir dış üniteye bağlanabilmektedir.[9]

Aynur, VRF sistemlerinin ofis uygulamasındaki performansları ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Sisteme iki farklı kontrol modu uygulanmıştır. Bireysel kontrol modunda, bütün iç üniteler kendi termostatları ile kontrol edilmiştir. Ana kontrol modunda ise, bütün iç üniteler ofis ortamının merkezine konulan tek bir termostat vasıtası ile kontrol edilmiştir. Sonuçta, bireysel kontrol modunda, ana kontrol moduna göre hem daha iyi ısı konforu hem de daha yüksek verim elde edilmiştir.[10]

VRF sistemlerinde iç ünite bulunan sıcaklık sensörü, gerçek hava sıcaklığı ile termostat sıcaklığını karşılaştırmak için kullanılır. Sıcaklık farkına göre, iç üniteye giden soğutucu akışkan debisi EEV tarafından ayarlanır. Böylece, termostat sıcaklığı ve gerçek ortam sıcaklığına göre, her bir iç ünite birbirinden bağımsız bir şekilde kontrol edilebilir ve iç ünitelerin bir kısmı çalışmasa bile diğerleri çalışmasına devam edebilir.

Böylece, farklı bölgeler birbirinden bağımsız sıcaklıklara sahip olabilir.[10]

Hai, buz depolama tanklı çok yönlü VRF sistemi üzerine araştırma yapmış ve yeni bir sistem tasarlamıştır. Buz depolama tankı ile birlikte ekstra 30°C alt soğutma sağlanmış ve bu durum enerji verim oranında %25 artış sağlamıştır. Shanghai'daki elektrik fiyatları göz önüne alındığında bu sistemin yatırım geri dönüş süresi 3 yıl olarak hesaplanmıştır. [11]

Aynur, değişen dış hava koşullarında VRF sistemine entegre bir ısı geri kazanımlı havalandırma sistemi kullanarak, bunun ısıl konfora, enerji tüketimine ve sistemin verimine etkisini incelemiştir. Bu araştırma, havalandırmanın iç alan sıcaklık kontrolüne etkisi olmadığını, bunun yerine iç ortamın nemini artırarak konfor şartlarını düşürdüğünü ortaya koymuştur. Ayrıca bu sistemin, dış ünitenin enerji tüketimini artırırken (havalandırma sistemi destekli VRF sistemi değerine göre %27,8 daha fazla enerji tüketmiştir), VRF sisteminin verimine önemli bir katkısı olmadığı gözlemlenmiştir. [12]

Aynur, VRF sistemine, havalandırma sistemi ve rejeneratif ısı pompası destekli kurutucu entegre ederek, iki sisteme performans testi uygulamıştır. Bu durumda rejeneratif ısı pompası destekli kurutucu kullanan sistemin daha iyi konfor şartı ve daha iyi nem kontrolü sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ısı pompası destekli kurutucunun soğutma yüküne yaptığı katkı ile birlikte VRF sistemi %26,3 daha az enerji tüketmiştir. Üç modda çalışması incelenmiştir; havalandırmasız, ısı pompası destekli kurutucu ile birlikte, ısı pompası destekli kurutucu-nem alma destekli. Araştırma sonuçları, VRF sistemlerinde ısı pompası destekli kurutucu kullanılmasının uygun olduğunu göstermiştir. [13]

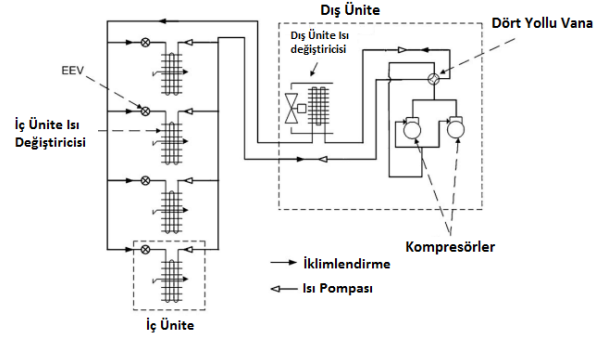
Çamdalı ve Tunç, termoeconominin temel prensipleri ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, ekserji destekli maliyet minimizasyonu yapılmıştır. Yapılan çalışmada, termoeconominin ekserji üzerindeki etkisi incelenmiştir. [14]

Can, soğutma elemanlarında ekserji analizi yapmış, ekserji kaybını en aza indirmek için temel prensipler üzerine çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmada, debideki artış ile tersinmezliğin arttığı tespit edilmiştir. [15]

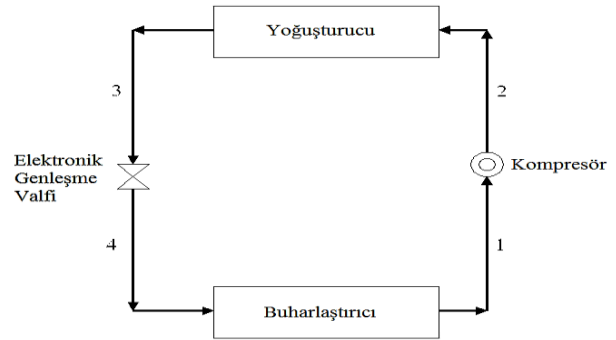
Doğan, su kaynaklı bir VRF sistemini detaylı bir şekilde incelemiş, sistemin bir alış-veriş merkezinde uygulamasını analiz etmiştir. Çalışmasında, su kaynaklı ve hava kaynaklı sistemler arasındaki doğru seçimin önemi hakkında bilgiler verilmiştir. [16]

Eğriboyun, ısı geri kazanımlı değişken soğutucu akışkan debili klima sisteminin termodinamik analizini yapmıştır. Çalışmasında soğutucu akışkan debilerinin hesabını yapmış ve soğutucu akışkanın sistem elemanları içerisinde izlediği yolu göstermiştir. [17]

2. SİSTEMİN TERMODİNAMİK ANALİZİ (THERMODYNAMIC ANALYSIS OF THE SYSTEM)



Şekil 1. Dört adet iç üniteli VRF sistemi (VRF System with Four Indoor Unit)



Şekil 2. VRF Sisteminin Şematik Gösterimi (Schematic view of VRF System)

Şekil 1'de verilen sisteme öncelikle 4 farklı akışkan kullanıldığı durumlarda, termodinamiğin I. Yasası uygulanmıştır. Bunun sonunda sistemde kullanılan soğutucu akışkanın debileri hesaplanmıştır.

$$\text{Kütlenin Korunumu Yasası } \frac{dM}{dx} = \sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} \quad (1)$$

Termodinamiğin I. Yasası

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{in} \dot{m} (e + Pv) - \sum_{out} \dot{m} (e + Pv) \quad (2)$$

Sistemdeki elemanlar için I. Yasa

$$\text{uygulanmıştır. } \dot{Q}_{comp} = \dot{m}(\Delta h_{comp}) \quad (3)$$

$$\dot{Q}_{evap_i} = \dot{m}(\Delta h_{evap}) \quad (4)$$

I. Yasa uygulamasından sonra, Sisteme Termodinamiğin II. Yasası uygulanmıştır.

Termodinamiğin II. Yasası (Entropi Oluşumu)

$$\dot{S}_{gen} = \frac{dS}{dx} - \sum_i \frac{\dot{Q}_i}{T_i} + \sum_{out} \dot{m}s - \sum_{in} \dot{m}s \geq 0 \quad (5)$$

Sistemdeki Elemanların tamamı için ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\text{Kompresör: } (T_0 \dot{S}_{gen})_{comp} = \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) \dot{Q}_{comp} - \dot{W}_{comp} + \dot{\phi}_{comp,in} - \dot{\phi}_{comp,out} \quad (6)$$

Buharlaştırıcı:

$$(T_0 \dot{S}_{gen})_{evap} = \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) \dot{Q}_{evap} - \dot{W}_{evap} + \dot{\phi}_{evap,in} - \dot{\phi}_{evap,out} \quad (7)$$

Kondenser:

$$(T_0 \dot{S}_{gen})_{cond} = \left(1 - \frac{T_0}{T_f}\right) \dot{Q}_{cond} - \dot{W}_{cond} + \dot{\phi}_{cond,in} - \dot{\phi}_{cond,out} \quad (8)$$

$$\text{Genleşme Valfi: } (T_0 \dot{S}_{gen})_{exp} = \dot{\phi}_{exp,in} - \dot{\phi}_{exp,out} \quad (9)$$

Sistemdeki elemanların ekserji kayıpları bulunduktan sonra, toplam ekserji kaybı hesaplanmıştır.

$$\dot{X}_{des} = (T_0 \dot{S}_{gen})_{comp} + (T_0 \dot{S}_{gen})_{evap} + (T_0 \dot{S}_{gen})_{cond} + (T_0 \dot{S}_{gen})_{exp} \quad (10)$$

Sistem için ekserji analizi yapılmıştır.

$$\dot{E}_w = \sum_{i=1}^n [(\bar{h}_i - T_0 \bar{s}_i)_{in} - \mu_{0,i}] \dot{N}_{i,in} - \sum_{i=1}^n [(\bar{h}_i - T_0 \bar{s}_i)_{out} - \mu_{0,i}] \dot{N}_{i,out} - T_0 \dot{S}_{gen} \quad (11)$$

Örnek uygulamamızda, 4 iç üniteye sahip bir ısı geri kazanımlı VRF Sisteminin 5 farklı koşulda ve 4 farklı soğutucu akışkan kullanılması durumlarında I. Kanun ve II. Kanun analizi yapılmıştır. Örnek sistemde soğutucu akışkan olarak R410A, R22, R404A ve R507 soğutucu akışkanları kullanılmıştır.

Şekil 2’de gösterildiği üzere hesaplamalarda gösterilen, 1. nokta kompresör girişini, 2. nokta kompresör çıkışını, 3. nokta yoğunlaştırıcı çıkışını ve 4. nokta buharlaştırıcı girişini göstermektedir.

Soğutucu akışkanlara ait termodinamik özellikler, ilgili akışkanlara ait basınç-entalpi diyagramlarından, doymuş sıvı ve doymuş buhar özellikleri tablolarından ve kızgın buhar özellikleri tablolarından alınmıştır.

R410A soğutucu akışkanı için analiz sonuçları,

Çizelge 1. R410A Soğutucu Akışkanı için Sistemin Özellikleri (Values of System for R410A Refrigerant)

R410	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg K)
1	12	9,90	431,85	1,82940
2	82,54	33,96	466,8	1,85210
3	50	33,96	292,19	1,30060
4	7	9,90	292,19	1,32890

Çizelge 2. R410A Soğutucu Akışkanı için Sistemin Isı Yükleri ve Debileri (Heat Load and Mass Flow Rate of System for R410A Refrigerant)

İŞLETME DURUMU	İç Ünite Yükleri (kW)	Isıl Yükler ve Debiler			
		Q _b (kW)	Q _y (kW)	W _k (kW)	Kütleli Debi (kg/s)
A Yanlız Soğutma	20	20	25	5	0,14320
B 3 Ünite Soğutma	15	15	18,75	3,75	0,10740
1 Ünite Isıtma	5				
C 2 Ünite Soğutma	10	10	12,50	2,5	0,07160
2 Ünite Soğutma	10				
D 1 Ünite Soğutma	5	12	15	3	0,08592
3 Ünite Soğutma	15				
E Yanlız Isıtma	20	16	20	4	0,11456

Çizelge 3. R410A Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Entropi Oluşumları (Entropy Generations of System Components in Five Different Working Conditions for R410A Refrigerant)

Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Entropi Oluşum					
Kompresör	0,00325	0,00244	0,00163	0,00195	0,00260
Genleşme Valfi	0,00405	0,00304	0,00203	0,00243	0,00324
Buharlaştırıcı	0,00025	0,00018	0,00012	0,00015	0,00020
Kondenser	0,00276	0,00207	0,00138	0,00165	0,00221

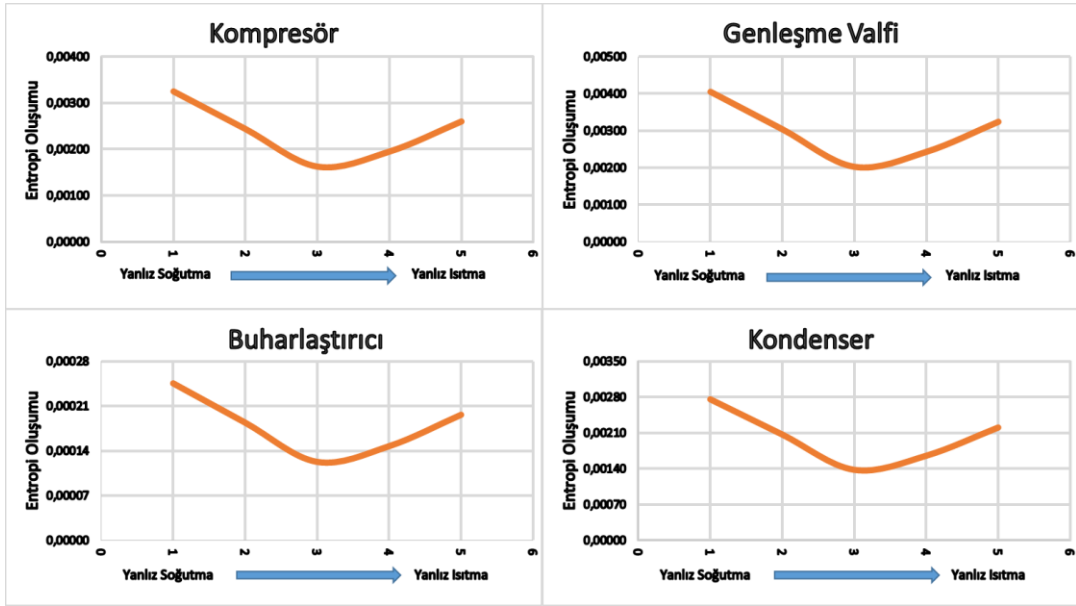
Çizelge 4. R410A Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Ekserji Kayıpları (Exergy Loses of System Components in Five Different Working Conditions for R410A Refrigerant)

Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Ekserji Kayıpları (Tersinmezlik)					
Kompresör	0,96872	0,72654	0,48436	0,58123	0,77498
Genleşme Valfi	1,20770	0,90578	0,60385	0,72462	0,96616
Buharlaştırıcı	0,07316	0,05487	0,03658	0,04389	0,05853
Kondenser	0,82189	0,61641	0,41094	0,49313	0,65751
Toplam	3,07147	2,30360	1,53574	1,84288	2,45718

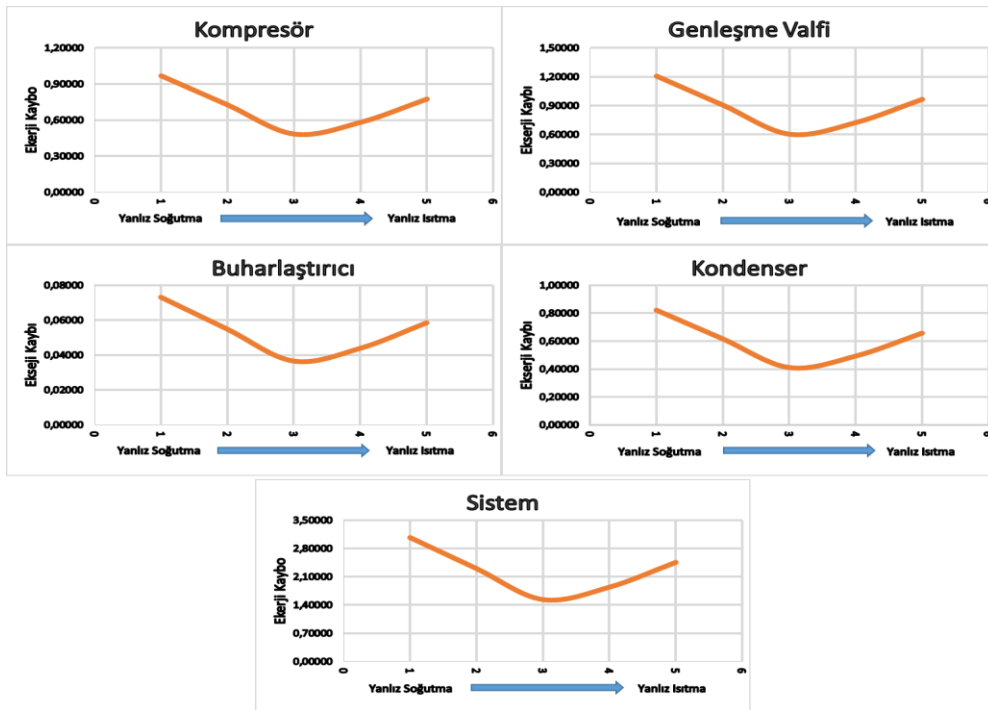
Çizelge 5. R410A Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Ekserji Dengesi (Exergy Balances of System Components in Five Different Working Conditions for R410A Refrigerant)

Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Ekserji Dengesi					
Kompresör	4,03629	3,02722	2,01814	2,42177	3,22903
Genleşme Valfi	-1,20770	-0,90578	-0,60385	-0,72462	-0,96616
Buharlaştırıcı	19,92684	14,94513	9,96342	11,95611	15,94147
Kondenser	-24,18313	-18,13735	-12,09156	-14,50988	-19,34650

Çizelge 2’de görüldüğü üzere sistemin eş zamanlı ısıtma-soğutma yaptığı yani 2 iç ünitenin soğutma ve 2 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda en düşük soğutucu akışkan debisi gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak da çizelge 3’te ve çizelge 4’te görüldüğü üzere en düşük entropi oluşumu ve ekserji kaybı meydana gelmiştir. Çizelge 4’te görüldüğü üzere, bütün iç ünitelerin soğutma yaptığı durumda 3,07 kW, 3 ünitenin soğutma 1 ünitenin ısıtma yaptığı durumda 2,3 kW, 2 iç ünitenin soğutma ve 2 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,53 kW, 1 iç ünitenin soğutma 3 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,84 ve bütün iç ünitelerin ısıtma yaptığı durumda 2,45 kW ekserji kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 3. R410A Soğutucu Akışkanı İçin Farklı Çalışma Koşullarında Sistem Ana Elemanlardaki Entropi Oluşumu (Entropy Generations of System Components in Different Working Conditions for R410A Refrigerant)



Şekil 4. R410A Soğutucu Akışkanı İçin Farklı Çalışma Koşullarında Sistemin Tamamı ve Ana Elemanlardaki Ekserji Kaybı (Exergy Losses of System Components and Entire System in Different Working Conditions for R410A Refrigerant)

R22 soğutucu akışkanı için analiz sonuçları,

Çizelge 6. R22 Soğutucu Akışkanı İçin Sistemin Özellikleri (Values of System for R22 Refrigerant)

R22	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg K)
1	12	6,20	409,04	1,750
2	82,54	22,00	445,5	1,768
3	50	22,00	263,2	1,203
4	7	6,20	263,2	1,228

Çizelge 7. R22 Soğutucu Akışkanı İçin Sistemin Isı Yükleri ve Debileri (Heat Load and Mass Flow Rate of System for R22 Refrigerant)

İŞLETME DURUMU	İç Ünite Yükleri (kW)	Isıl Yükler ve Debiler			
		Q _b (kW)	Q _y (kW)	W _k (kW)	Kütleli Debi (kg/s)
A Yanlız Soğutma	20	20	25	5	0,13714
B 3 Ünite Soğutma	15	15	18,75	3,75	0,10285
1 Ünite Isıtma	5				
C 2 Ünite Soğutma	10	10	12,50	2,5	0,06857
2 Ünite Soğutma	10				
D 1 Ünite Soğutma	5	12	15	3	0,08228
3 Ünite Soğutma	15				
E Yanlız Isıtma	20	16	20	4	0,10971

Çizelge 8. R22 Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Entropi Oluşumları (Entropy Generations of System Components in Five Different Working Conditions for R22 Refrigerant)

Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Entropi Oluşum					
Kompresör	0,00247	0,00185	0,00123	0,00148	0,00197
Genleşme Valfi	0,00343	0,00257	0,00171	0,00206	0,00274
Buharlaştırıcı	0,00016	0,00012	0,00008	0,00009	0,00013
Kondenser	0,00126	0,00095	0,00063	0,00076	0,00101

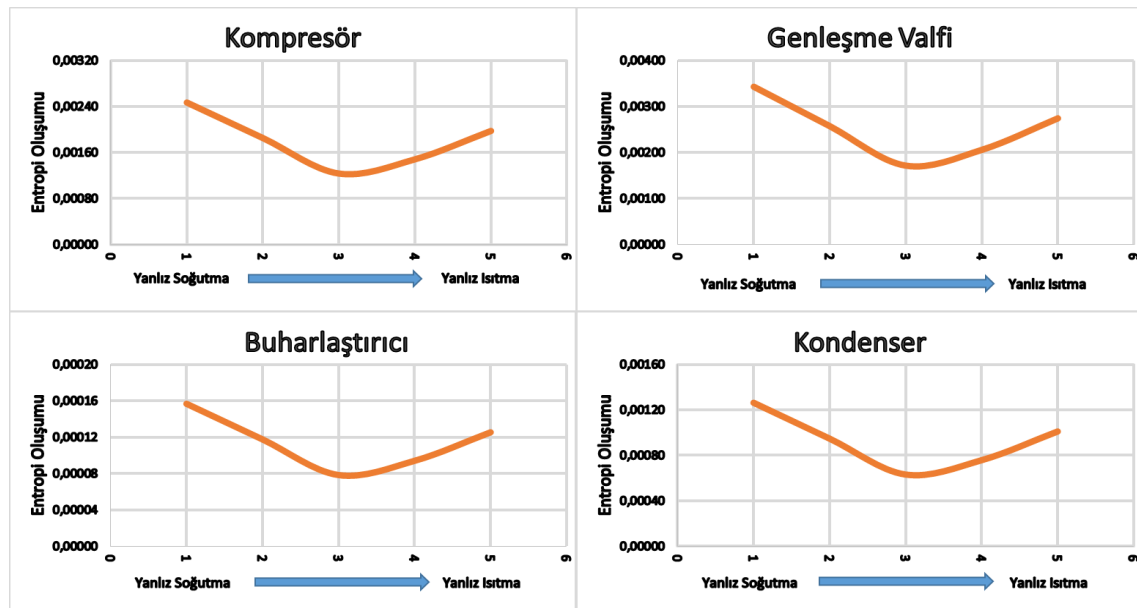
Çizelge 9. R22 Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Ekserji Kayıpları (Exergy Loses of System Components in Five Different Working Conditions for R22 Refrigerant)

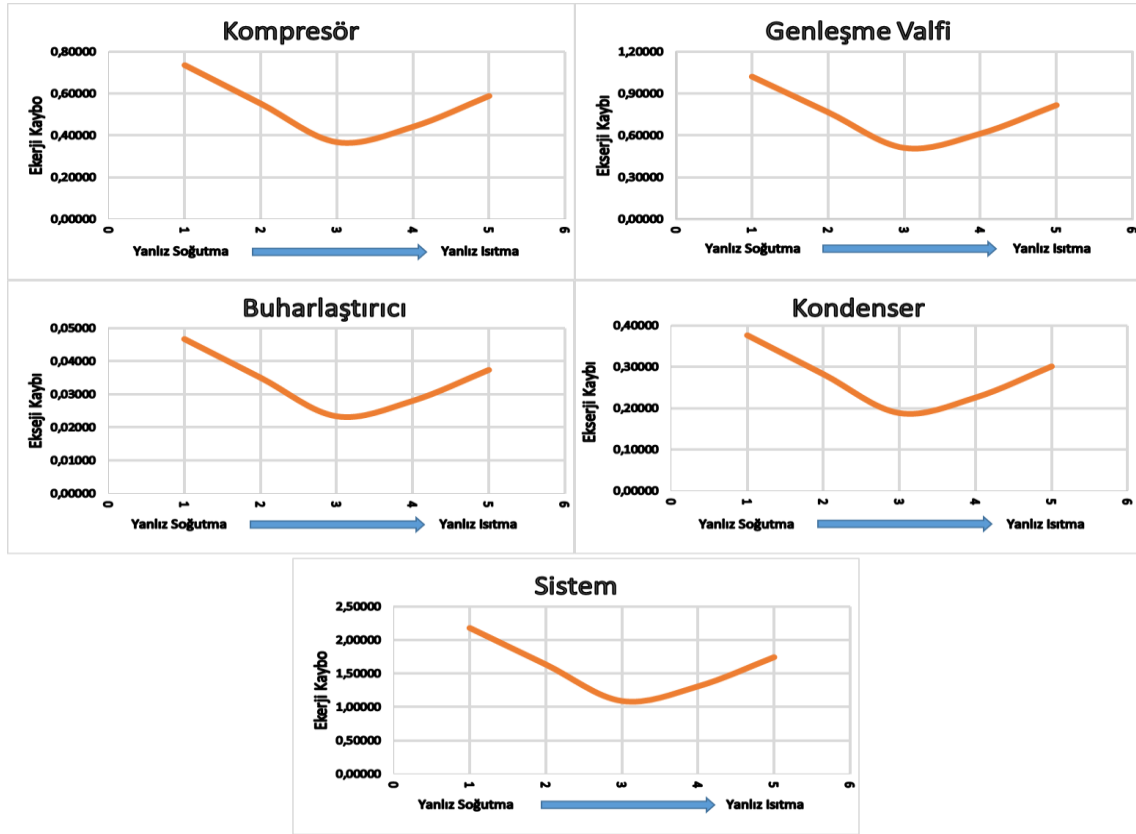
Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Ekserji Kayıpları (Tersinmezlik)					
Kompresör	0,73560	0,55170	0,36780	0,44136	0,58848
Genleşme Valfi	1,02167	0,76625	0,51083	0,61300	0,81733
Buharlaştırıcı	0,04670	0,03503	0,02335	0,02802	0,03736
Kondenser	0,37627	0,28220	0,18814	0,22576	0,30102
Toplam	2,18025	1,63518	1,09012	1,30815	1,74420

Çizelge 10. R22 Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Ekserji Dengesi (Exergy Balances of System Components in Five Different Working Conditions for R22 Refrigerant)

Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Ekserji Dengesi					
Kompresör	4,26440	3,19830	2,13220	2,55864	3,41152
Genleşme Valfi	-1,02167	-0,76625	-0,51083	-0,61300	-0,81733
Buharlaştırıcı	19,95330	14,96497	9,97665	11,97198	15,96264
Kondenser	-24,62373	-18,46780	-12,31186	-14,77424	-19,69898

Çizelge 7'de görüldüğü üzere sistemin eş zamanlı ısıtma-soğutma yaptığı yani 2 iç ünitenin soğutma ve 2 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda en düşük soğutucu akışkan debisi gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak da çizelge 8'de ve çizelge 9'da görüldüğü üzere en düşük entropi oluşumu ve ekserji kaybı meydana gelmiştir. Çizelge 9'da görüldüğü üzere, bütün iç ünitelerin soğutma yaptığı durumda 2,18 kW, 3 ünitenin soğutma 1 ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,63 kW, 2 iç ünitenin soğutma ve 2 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,09 kW, 1 iç ünitenin soğutma 3 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,30 ve bütün iç ünitelerin ısıtma yaptığı durumda 1,74 kW ekserji kaybı meydana gelmiştir.

**Şekil 5.** R22 Soğutucu Akışkanı İçin Farklı Çalışma Koşullarında Sistem Ana Elemanlardaki Entropi Oluşumu (Entropy Generations of System Components in Different Working Conditions for R22 Refrigerant)



Şekil 6. R22 Soğutucu Akışkanı İçin Farklı Çalışma Koşullarında Sistemin Tamamı ve Ana Elemanlardaki Eksjerji Kaybı (Exergy Losses of System Components and Entire System in Different Working Conditions for R22 Refrigerant)

R404A soğutucu akışkanı için analiz sonuçları,

Çizelge 11. R404A Soğutucu Akışkanı İçin Sistemin Özellikleri (Values of System for R404A Refrigerant)

R404	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg K)
1	12	7,50	394,55	1,688
2	82,54	25,60	422,4	1,695
3	50	25,60	283,2	1,266
4	7	7,50	283,2	1,287

Çizelge 12. R404A Soğutucu Akışkanı İçin Sistemin Isı Yükleri ve Debileri (Heat Load and Mass Flow Rate of System for R404A Refrigerant)

İŞLETME DURUMU	İç Ünite Yükleri (kW)	Isıl Yükler ve Debiler			
		Q_b (kW)	Q_y (kW)	W_k (kW)	Kütleli Debi (kg/s)
A	Yalnız Soğutma	20	25	5	0,17961
B	3 Ünite Soğutma	15	18,75	3,75	0,13471
	1 Ünite Isıtma				
C	2 Ünite Soğutma	10	12,50	2,5	0,08981
	2 Ünite Soğutma				
D	1 Ünite Soğutma	12	15	3	0,10777
	3 Ünite Soğutma				
E	Yalnız Isıtma	16	20	4	0,14369

Çizelge 13. R404A Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Entropi Oluşumları (Entropy Generations of System Components in Five Different Working Conditions for R404A Refrigerant)

Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Entropi Oluşum					
Kompresör	0,00131	0,00098	0,00066	0,00079	0,00105
Genleşme Valfi	0,00377	0,00283	0,00189	0,00226	0,00302
Buharlaştırıcı	0,00054	0,00041	0,00027	0,00033	0,00043
Kondenser	0,00083	0,00063	0,00042	0,00050	0,00067

Çizelge 14. R404A Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Ekserji Kayıpları (Exergy Losses of System Components in Five Different Working Conditions for R404A Refrigerant)

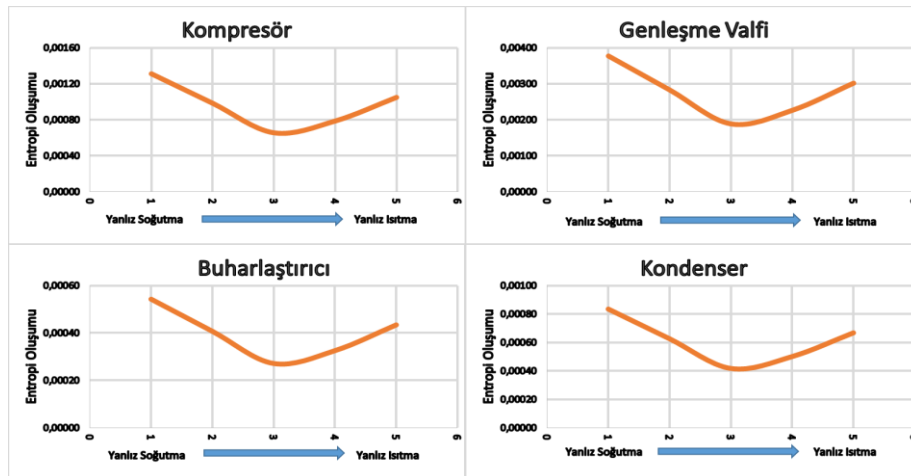
Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Ekserji Kayıpları (Tersinmezlik)					
Kompresör	0,39073	0,29305	0,19537	0,23444	0,31259
Genleşme Valfi	1,12402	0,84302	0,56201	0,67441	0,89922
Buharlaştırıcı	0,16172	0,12129	0,08086	0,09703	0,12938
Kondenser	0,24878	0,18658	0,12439	0,14927	0,19902
Toplam	1,92525	1,44394	0,96263	1,15515	1,54020

Çizelge 15. R404A Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Ekserji Dengesi (Exergy Balances of System Components in Five Different Working Conditions for R404A Refrigerant)

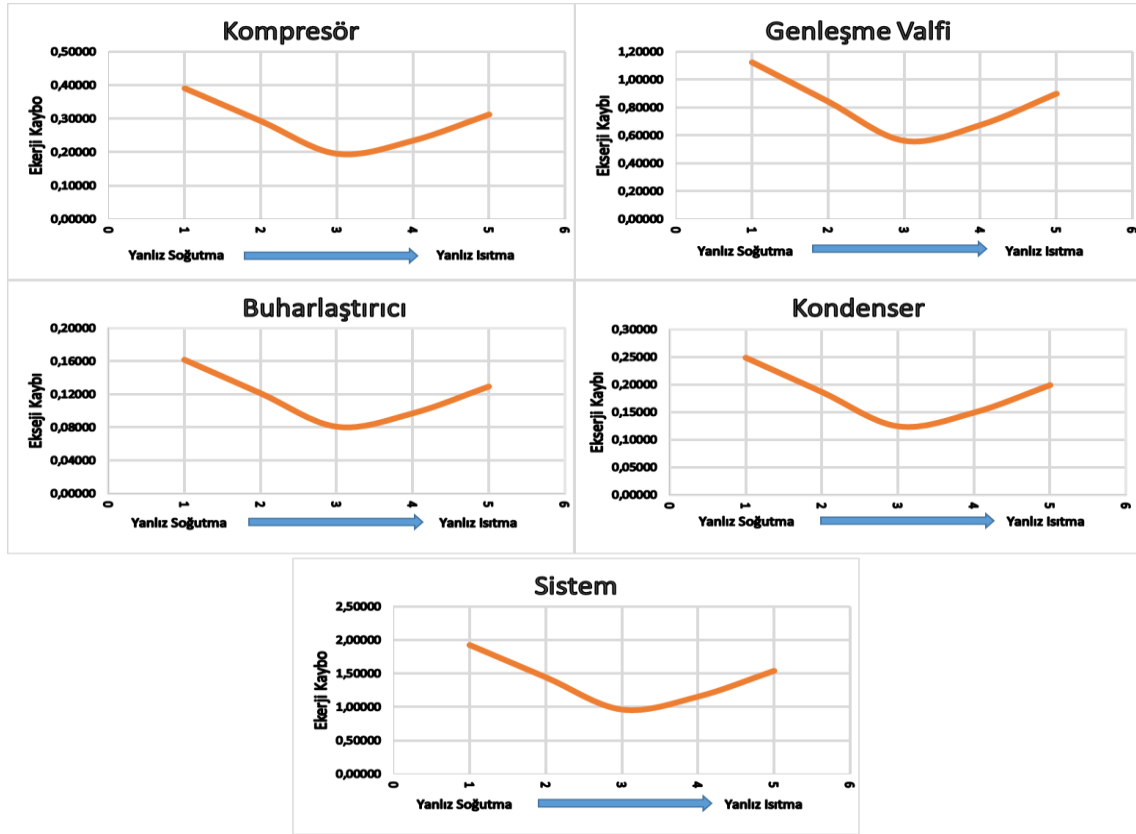
Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Ekserji Dengesi					
Kompresör	4,61151	3,45863	2,30576	2,76691	3,68921
Genleşme Valfi	-1,12402	-0,84302	-0,56201	-0,67441	-0,89922
Buharlaştırıcı	19,83828	14,87871	9,91914	11,90297	15,87062
Kondenser	-24,75347	-18,56510	-12,37673	-14,85208	-19,80277

Çizelge 12’de görüldüğü üzere sistemin eş zamanlı ısıtma-soğutma yaptığı yani 2 iç ünitenin soğutma ve 2 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda en düşük soğutucu akışkan debisi gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak da çizelge 13’de ve çizelge 14’te görüldüğü üzere en düşük entropi oluşumu ve ekserji kaybı meydana gelmiştir. Çizelge 14’te görüldüğü üzere, bütün iç ünitelerin

soğutma yaptığı durumda 1,92 kW, 3 ünitenin soğutma 1 ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,44 kW, 2 iç ünitenin soğutma ve 2 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda 0,96 kW, 1 iç ünitenin soğutma 3 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,15 ve bütün iç ünitelerin ısıtma yaptığı durumda 1,54 kW ekserji kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 7. R404A Soğutucu Akışkanı İçin Farklı Çalışma Koşullarında Sistem Ana Elemanlardaki Entropi Oluşumu (Entropy Generations of System Components in Different Working Conditions for R404A Refrigerant)



Şekil 8. R404A Soğutucu Akışkanı İçin Farklı Çalışma Koşullarında Sistemin Tamamı ve Ana Elemanlardaki Eksjerji Kaybı (Exergy Losses of System Components and Entire System in Different Working Conditions for R404A Refrigerant)

R507 soğutucu akışkanı için analiz sonuçları,

Çizelge 16. R507 Soğutucu Akışkanı İçin Sistemin Özellikleri (Values of System for R507 Refrigerant)

R507	Sıcaklık (°C)	Basınç (bar)	Entalpi (kJ/kg)	Entropi (kJ/kg K)
1	12	7,75	390,40	1,671
2	82,54	26,50	418,80	1,680
3	50	26,50	277,20	1,240
4	7	7,75	277,20	1,260

Çizelge 17. R507 Soğutucu Akışkanı İçin Sistemin Isı Yükleri ve Debileri (Heat Load and Mass Flow Rate of System for R507 Refrigerant)

İŞLETME DURUMU	İç Ünite Yükleri (kW)	Isıl Yükler ve Debiler			
		Q _b (kW)	Q _y (kW)	W _k (kW)	Kütleli Debi (kg/s)
A	Yalnız Soğutma	20	25	5	0,17668
B	3 Ünite Soğutma	15	18,75	3,75	0,13251
	1 Ünite Isıtma				
C	2 Ünite Soğutma	10	12,50	2,5	0,08834
	2 Ünite Soğutma				
D	1 Ünite Soğutma	12	15	3	0,10601
	3 Ünite Soğutma				
E	Yalnız Isıtma	16	20	4	0,14134

Çizelge 18. R507 Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Entropi Oluşumları (Entropy Generations of System Components in Five Different Working Conditions for R507 Refrigerant)

Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Entropi Oluşum					
Kompresör	0,00159	0,00119	0,00080	0,00095	0,00127
Genleşme Valfi	0,00353	0,00265	0,00177	0,00212	0,00283
Buharlaştırıcı	0,00119	0,00089	0,00059	0,00071	0,00095
Kondenser	0,00152	0,00114	0,00076	0,00091	0,00122

Çizelge 19. R507 Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Ekserji Kayıpları (Exergy Loses of System Components in Five Different Working Conditions for R507 Refrigerant)

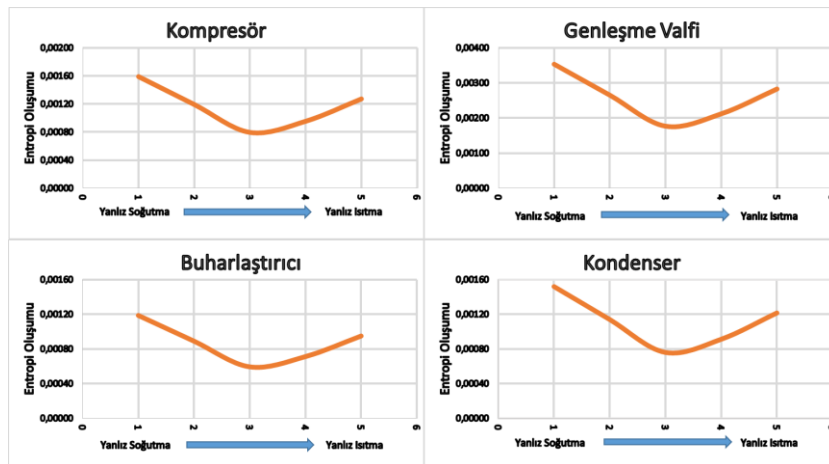
Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Ekserji Kayıpları (Tersinmezlik)					
Kompresör	0,47385	0,35539	0,23693	0,28431	0,37908
Genleşme Valfi	1,05300	0,78975	0,52650	0,63180	0,84240
Buharlaştırıcı	0,35351	0,26513	0,17675	0,21210	0,28281
Kondenser	0,45266	0,33950	0,22633	0,27160	0,36213
Toplam	2,33303	1,74977	1,16651	1,39982	1,86642

Çizelge 20. R507 Soğutucu Akışkanı İçin Beş Farklı Çalışma Durumu İçin Sistem Elemanlarındaki Ekserji Dengesi (Exergy Balances of System Components in Five Different Working Conditions for R507 Refrigerant)

Sistem Elemanları	A- Yanlız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yanlız Isıtma
Ekserji Dengesi					
Kompresör	4,54382	3,40786	2,27191	2,72629	3,63505
Genleşme Valfi	-1,05300	-0,78975	-0,52650	-0,63180	-0,84240
Buharlaştırıcı	19,64649	14,73487	9,82325	11,78790	15,71719
Kondenser	-24,56500	-18,42375	-12,28250	-14,73900	-19,65200

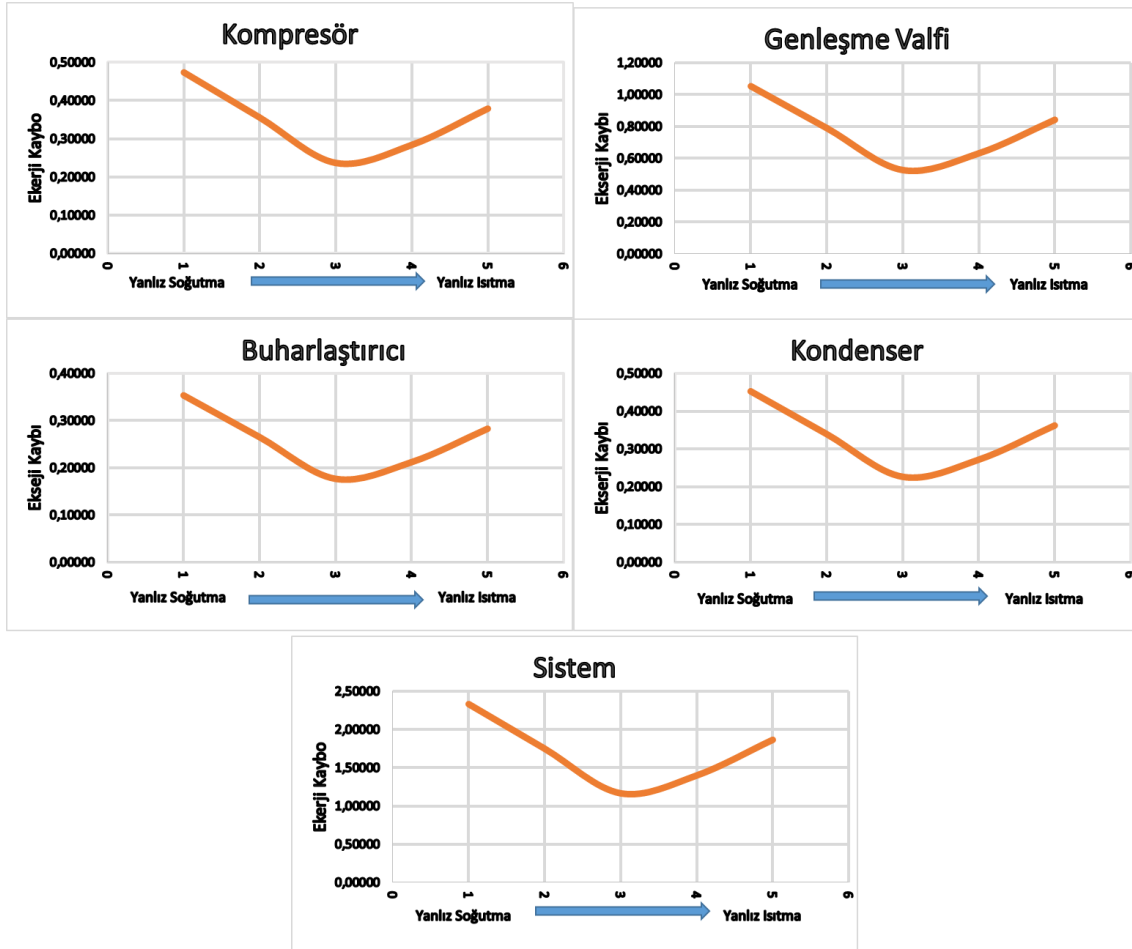
Çizelge 17'de görüldüğü üzere sistemin eş zamanlı ısıtma-soğutma yaptığı yani 2 iç ünitenin soğutma ve 2 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda en düşük soğutucu akışkan debisi gerçekleşmiştir. Buna bağlı olarak da çizelge 18'de ve çizelge 19'da görüldüğü üzere en düşük

entropi oluşumu ve ekserji kaybı meydana gelmiştir. Çizelge 19'da görüldüğü üzere, bütün iç ünitelerin soğutma yaptığı durumda 2,33 kW, 3 ünitenin soğutma 1 ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,74 kW, 2 iç ünitenin soğutma ve 2 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,16

**Şekil 9.** R507 Soğutucu Akışkanı İçin Farklı Çalışma Koşullarında Sistem Ana Elemanlardaki Entropi Oluşumu (Entropy Generations of System Components in Different Working Conditions for R507 Refrigerant)

kW, 1 iç ünitenin soğutma 3 iç ünitenin ısıtma yaptığı durumda 1,39 ve bütün iç ünitelerin ısıtma yaptığı durumda 1,86 kW ekserji kaybı meydana gelmiştir.

Termodinamik I. Kanun analizine göre sistemin 5 farklı koşulda ve 4 farklı soğutucu akışkan kullanılması durumlarında soğutucu akışkan debileri hesaplanmıştır.



Şekil 10. R507 Soğutucu Akışkanı İçin Farklı Çalışma Koşullarında Sistemin Tamamı ve Ana Elemanlardaki Ekserji Kaybı (Exergy Loses of System Components and Entire System in Different Working Conditions for R507 Refrigerant)

Çizelge 21. Farklı Soğutucu Akışkanlar İçin Sistemde Oluşan Toplam Ekserji Kayıpları (Exergy Loses in Entire System for Different Refrigerants)

Soğutucu Akışkan	A- Yalnız Soğutma	B- 3 Ünite Soğutma	C- 2 Ünite Soğutma	D-1 Ünite Soğutma	E- Yalnız Isıtma
Ekserji Kayıpları (Tersinmezlik)					
R410A	3,07147	2,30360	1,53574	1,84288	2,45718
R22	2,18025	1,63518	1,09012	1,30815	1,74420
R404A	1,95525	1,44394	0,96263	1,15515	1,54020
R507	2,33303	1,74977	1,16651	1,39982	1,86642

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Günümüzde enerji sorunu, tüm dünyanın en önemli sorunlarından bir tanesidir. Özellikle, yaklaşık %70 dışa bağımlılık oranı ile ülkemizin enerji sorunu başlıca sorunlarından biridir. Ayrıca CO₂ salınımı konusunda imzalanan sözleşmeler ile birlikte enerji konusunda daha hassas çalışmalar yapılması zorunlu bir hal almıştır. Bu çalışmada, örnek bir VRF sisteminin farklı çalışma koşullarında ve farklı soğutucu akışkan kullanıldığı durumlarda enerji ve ekserji analizi yapılmıştır. Termodinamiğin I. ve II. yasasına göre ekserji kayıplarının hesabı yapıp, karşılaştırılmıştır.

Sistemin eş zamanlı ısıtma ve soğutma yaptığı durumlarda soğutucu akışkan debisinin en düşük, bütün iç ünitelerin soğutma yaptığı durumlarda ise soğutucu akışkan debisinin en yüksek olduğu tespit edilmiştir. Termodinamik II. Kanun analizinde ise, 5 farklı koşulda ve 4 farklı soğutucu akışkan kullanılması durumlarında sistemin ana elemanlarında gerçekleşen entropi oluşumları hesaplanmıştır. Sistemin eş zamanlı ısıtma-soğutma yapma koşulunda gerçekleşen entropi üretimi, sistemdeki elemanlar bağımsız olarak ele alındığında, yalnız ısıtma ve yalnız soğutma yapma koşullarına göre daha az gerçekleştiği tespit edilmiştir. Bunun

sonucunda sistemin tamamı ele alındığında eş zamanlı ısıtma-soğutma yapma koşulunda gerçekleşen entropi oluşumunun, yalnız ısıtma ve yalnız soğutma yapma koşullarına göre daha az gerçekleştiği tespit edilmiştir. Sistem elemanlarının ekserji kayıpları hesaplandığında eş zamanlı ısıtma-soğutma yapma koşulunda sistemin ekserji kaybı, yalnız ısıtma ve yalnız soğutma yapma koşullarına göre önemli miktarda daha az gerçekleşmiştir. Ayrıca, R404A soğutucu akışkanı kullanılması durumunda sistemde meydana gelen ekserji kaybının en düşük olduğu tespit edilmiştir. R404A soğutucu akışkanını sırasıyla R22 ve R507 soğutucu akışkanları takip etmiş, R410A soğutucu akışkanı kullanılması durumunda ise en yüksek ekserji kaybının meydana geldiği tespit edilmiştir.

Analiz sonuçlarında da görüldüğü üzere, değişken soğutucu akışkan debili sistemlerin, eş zamanlı ısıtma ve soğutma ihtiyacı olan ortamlarda (otel, hastane gibi) kullanılması, sistemde oluşan ekserji kaybını en aza indirmektedir. Ayrıca daha farklı akışkanlar kullanılarak yapılacak analizlerle, sistemde meydana gelen ekserji kayıpları en düşük seviyeye indirilebilecektir. Bu çalışma, sistemde oluşan ekserji kayıplarını düşürecek çalışmalar yapılarak sistemin ekserji veriminin artırılabilmesi ve yeni ürünlerin tasarlanması açısından önemlidir.

KISALTMALAR ve SEMBOLLER (ABBREVIATIONS and SYMBOLS)

EEV	Elektronik Genleşme Valfi
VRF	Variable Refrigerant Flow
\dot{Q}	Sisteme verilen ısı enerjisi
\dot{W}	Sistemin çevreye yaptığı iş
\dot{m}	Debi
e	Birim kütle için iç enerji
P	Basınç
v	Özgül hacim
\dot{S}_{gen}	Entropi oluşumu
s	Birim kütle için entropi
h	Birim kütle için entalpi
T	Sıcaklık
φ	Birim ekserji
E_w	Ekserji
\dot{X}_{des}	Ekserji kaybı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Aynur, T.N., "Evaluation of a multi-split type air conditioning system under steady state and transient conditions", *Ph.D. thesis.*, Istanbul Technical University, Graduate School of Science Engineering and Technology, (2008).
2. Goetzler, W., "Variable Refrigerant Flow Systems", *ASHRAE Journal*, 49: 24-31, (2007).
3. Amarnath, A. and Blatt, M., "Variable refrigerant flow: where, why, and how", *Engineered Systems*, 25: 54-60, (2008).
4. Aynur, T. N., "Variable refrigerant flow systems: A review", *Energy and Buildings*, 42: 1106-1112, (2010).
5. Park, Y.C., Kim, Y.C. and Min, M.K., "Performance analysis on a multi-type inverter air conditioner", *Energy Conversion and Management*, 42 (13):1607-1621, (2001).
6. Xia, J., Winandy, E., Georges, B. and Lebrun, J., "Testing methodology for VRF systems", *9th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue, IN, USA, 1-8, (2002).
7. Masuda, M., Wakahara, K. and Matsui, K., "Development of a multi-split system air conditioner for residential use", *ASHRAE Transactions*, 97: 127-131, (1991).
8. Hai, X.H., Jun, S., Hand, Z.Y. and Bin, T.C., "Design and research of the digital VRV multiconnected units with three pipes type heat recovery system", *11th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue, West Lafayette, IN, USA, 1-5, (2006).
9. Li, Y., Wu, J. and S. Shiochi., "Modeling and energy simulation of the variable refrigerant flow air conditioning system with water-cooled condenser under cooling conditions", *Energy and Buildings*, 41: 949-957, (2009).
10. Aynur, T.N., Hwang, Y. and Radermacher, R., "Field performance measurements of a VRV AC/HP system", *11th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue, West Lafayette, IN, USA, 1-8, (2006).
11. Hai, X.H., Tao, Z., Yun, F.H. and Jun., S., "Design and research of the commercial digital VRV multi-connected units with sub-cooled ice storage system", *11th International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Purdue, West Lafayette, IN, USA, 1-5, (2006).
12. Aynur, T.N., Hwang, Y. and Radermacher, R., "Experimental evaluation of the ventilation effect on the performance of a VRV system in cooling mode—Part I: Experimental evaluation", *HVAC&R Research*, 14: 615-630, (2008).
13. Aynur, T.N., Hwang, Y. and Radermacher, R., "Field performance measurements of a heat pump desiccant unit in dehumidification mode", *Energy and Buildings*, 40: 2141-2147, (2008).
14. Çamdalı, Ü. ve Tunç, M., "Enerji Sistemlerinde Termodinamik Yaklaşım ve Uygulamalar", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(3): 49-56, (2004).
15. Can, A., "Soğutma Elemanlarının Ekserji Analizinin Deneysel Verilere Göre Yapılması", *VII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 163-175, (2005).
16. Doğan, V., "Su Kaynaklı VRF ve Antalya'da Bulunan Bir Alış Veriş Merkezinde Su Kaynaklı VRF Uygulaması", *IX. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir, 317-336, (2009).
17. Eyriboğun, M., "Isı Geri Kazanımlı Değişken Akışkan Debili (VRV/VRF) Klima Sisteminin Termodinamiği ve Akış Kontrolü", *Ulusal İklimlendirme Kongresi*, Antalya, 283-299, (2011).

DistaloyAB Tozundan Üretilmiş ve Elmas Nanoparçacık Katkılı Krom Kaplanmış Toz Metal Malzemelerin Korozyon Davranışlarının Araştırılması

E. Zeynep BİLGİLİ^{*1}, Elmas SALAMCI², Abdurrahman ASAN³

¹TC Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, 06570 Ankara

²Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği, Bölümü, 06570 Ankara

³Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği, Bölümü, 19030 Çorum

(Geliş/Received : 26.11.2016 ; Kabul/Accepted : 30.12.2016)

ÖZ

Bu çalışmada; iki farklı kimyasal bileşimdeki DistaloyAB tozlarından üretilen numunelere uygulanan nanoelmas ilaveli krom elektrokaplama işleminin numunelerin mikroyapı ve korozyon davranışına etkisi incelenmiştir. % 0,2 ve % 0,5 karbon ilaveli DistaloyAB tozları 420 MPa basınçta sıkıştırılmış ve sinterlenmiştir. Üretilen numunelerin SEM ve AFM incelemesi ve korozyon testleri yapılmıştır. Numunelerin korozyon hızları 0,1M H₂SO₄ ve 0,1M NaOH çözeltilerinde, Tafel ekstrapolasyonu yöntemi ile ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar, toz metal numunelerin nanoelmas ilaveli krom ile kaplanması ile korozyon hızlarında önemli azalmalar olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Kompozit Kaplama, Nanoelmas, Korozyon, AFM.

Investigation of Corrosion Behavior of Powder Metallurgy Materials Produced From DistaloyAB Powders and Electrochemically Coated Chromium With Diamond Nanoparticle Additive

ABSTRACT

In this study, 0,2% and %0,5 carbon added DistaloyAB metal powders were pressed under 420 MPa compression and sintered. The specimens produced were coated with diamond nanoparticle added chromium using electrochemical method. The coated and uncoated specimens were compared and the effect of coating on the microstructure, and corrosion behavior of the powder metal specimens was studied. The specimens were examined with scanning electron microscope (SEM) and atomic force microscopy (AFM). Their corrosion rates were measured in 0,1 M H₂SO₄ and 0,1M NaOH solutions by applying Tafel extrapolation method. The experimental results showed that coating of powder specimens with diamond nanoparticles added chromium decreases corrosion rate the samples.

Keywords: Powder Metallurgy, Composite Coating, Nanodiamond, Corrosion, AFM.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Toz metalurjisi küçük yapısal parça imalatında hızla gelişen bir teknolojidir. Toz metalurjisinde elde edilen düzenli mikroyapı, alaşım ve kompozit imalatına ilgiyi artırmıştır. Toz metalurjisi ürünlerinde aşınma ve korozyon endüstride sık karşılaşılan bir problem olmuştur. Bu durum üretilen parçaların kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle genellikle korozyonun ve aşınmanın olmayacağı ortamlar tercih edilmektedir. Bu problemlerin çözülmesi ile toz metalurjisinin endüstriyel uygulamalarının sayısı artacaktır. Endüstride metal parçaların korozyon direncini iyileştirmek amacı ile

kaplama, anodik veya katodik koruma ve alaşımlama yöntemleri kullanılmaktadır [1]. Kaplamalar akımsız ve elektrolitik kaplama olarak yapılmaktadır. Akımsız kaplama ile akımlı kaplama karşılaştırıldığında, kaplama hızı, sertlik, aşınma direnci ve sürtünme katsayısı değerlerinde farklılıklar olduğu, elektrolitik kaplamada söz konusu değerlerinin daha yüksek olduğu bulunmuştur[2].

Uygulanan kaplamaların özelliklerini iyileştirmek ve uygulama alanlarını genişletmek için kaplama içerisinde nano boyuttaki partiküllerin dağıtılması ile kompozit kaplamalar oluşturulmaktadır. Bu tür kaplamalarda krom; matris olarak aşınma direnci yüksek ve gelecek vaat eden malzeme olarak bilinmektedir. Literatürde krom kompozit kaplamada çok çeşitli parçacıklar

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: esalamci@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 223-230

kullanılmıştır. Al_2O_3 , TiO_2 , B_4C , TiB_2 , Cr_3C_2 , ZrB_2 , WC , CeO_2 , grafit ve elmas parçacıklar örnek olarak verilebilir [3].

Nanoelmas parçacıkların kompozit kaplamanın aşınma ve korozyon direncini artırdığı araştırmacılar tarafından belirtilmiştir [4,5]. Nanoelmas ilaveli krom kaplamalar farklı çelikler üzerine uygulanmıştır[6,7]. Ancak literatürde toz metal parça üzerine nanoelmas ilaveli krom kaplamaya rastlanmamıştır. Bu çalışmada; nanoelmas ilaveli krom kaplamaların, karbon oranları farklı olan toz metal numunelere uygulaması yapılmış, kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin mikroyapıları ile 0,1M H_2SO_4 ve 0,1M NaOH çözeltilerinde korozyon direnci incelenmiştir.

2. MALZEME VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

Bu çalışmada kullanılan kısmen ön alaşımlı karbon ilaveli DistaloyAB tozlarının kimyasal bileşimi Çizelge.1'de verilmiştir. Toz numuneler 420 MPa sıkıştırma basıncı ile tek yönlü olarak preslenmiş, endogaz atmosferinde 1120 °C'de 30 dakika süre ile sinterlenmiş ve daha sonra aynı soğuma hızı ve atmosfer altında oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan metal tozunun kimyasal bileşimi (% ağırlık) The chemical composition of the metal powder used in the study (weight %)

Baz Toz	Grafit	Cu	Ni	Mo	MnS	Fe	Yağlayıcı (H.Wachs)
Distaloy AB	0,2	1,5	1,7	0,5	0,5	Kalan	0,9
Distaloy AB	0,5	1,5	1,7	0,5	0,5	Kalan	0,9

Teorik yoğunluk, %0,2 C ilaveli DistaloyAB tozlarından üretilen numuneler için 7.89 g/cm^3 ve % 0,5 C ilaveli DistaloyAB tozlarından üretilen numuneler için 7.88 g/cm^3 olarak hesaplanmıştır. Sinterlenen numunelerin yoğunlukları Arşimet tekniği ile bulunmuştur. Sinterleme sonrası gözenek miktarları belirlenmiştir.

Kaplama banyosu kimyasal bileşimi 220 g/l CrO_3 , 2.2 g/l H_2SO_4 ve 25 g/l nanoelmas karışımından oluşturulmuştur. Nanoelmasların boyutları ortalama 6 nm'dir. Nanoelmas tipi DND-B olup, NPO Altai,Bissk (Russian Federation)(Patlatma sentezi ve saflaştırma) ürünüdür. Nanoelmasların çözelti içerisinde topaklanmaması için, kaplama sırasında 120 devir/dak hızında manyetik karıştırıcı kullanılmıştır. Banyo bileşimi ve çalışma koşulları (banyo sıcaklığı 50 °C, akım yoğunluğu 45 A/dm², kaplama süresi 45 dakika) kaplama sırasında sabit kalacak şekilde ayarlanmıştır.

Mikroyapı incelemesi için sıcak bakalite alınan kaplamasız numuneler geleneksel SiC zımparalama ve ardından 3µm ve 1µm elmas süspansiyonlarla keçe ile parlatılmıştır ve ultrasonik temizleme yapılmıştır. Kaplamasız ve kaplamalı numunelerin yüzeyleri mikroyapı incelemesi için optik mikroskop Olympus GX79 ve SEM FEI QUANTA 450 FEG cihazlarında yapılmıştır. AFM görüntü analizi Nanomagnetics Ins. marka AFM cihazı ile dinamik modda alınmış ölçümler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kaplanmamış ve kaplanmış numuneler soğuk bakalite alınarak korozyon testi için çalışma elektrotu hazırlanmıştır. Elektrokimyasal ölçümler 0,1M H_2SO_4 and 0,1M NaOH çözeltilerinde oda sıcaklığında yapılmıştır. Üçlü elektrot sisteminde, referans elektrot olarak doygun kalomel elektrot (DKE), karşı elektrot olarak platin tel kullanılmıştır. Elektrokimyasal ölçümler, Ivium Compactstat cihazı ve IviumSoft programı kullanılarak yapılmıştır. Tafel ekstrapolasyonu yönteminde anodik ve katodik Tafel polarizasyon eğrileri elde edilerek korozyon hızı, korozyon potansiyeli Ekor, Tafel eğimleri β_a ve β_k ve polarizasyon rezistansı belirlenmiştir.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

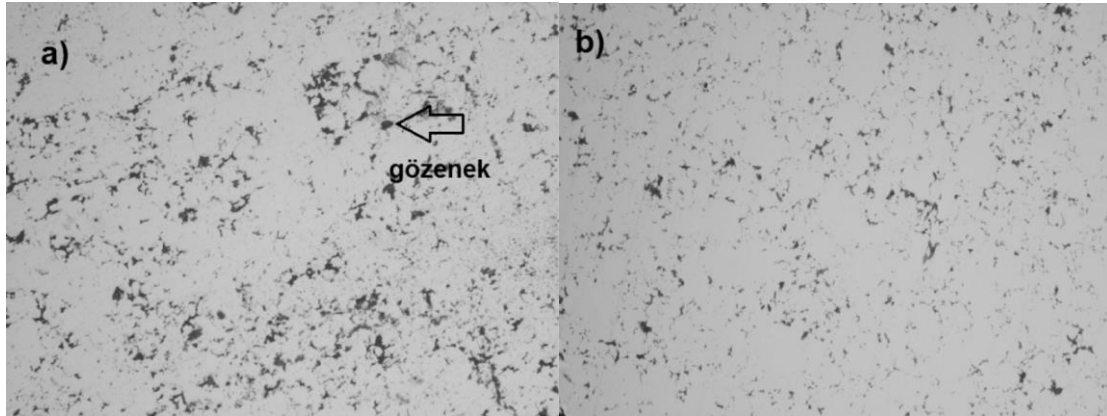
3.1. Yoğunluk ve Mikroyapı (Density and Microstructure)

Demir esaslı toz metallerin kimyasal bileşim farklılığının yoğunluk ve gözenekliliğe etkisi Çizelge.2'de görülmektedir. Numunelerin sinterleme sonrası yoğunlukları sırasıyla yaklaşık $7,10 \text{ g/cm}^3$ ve 7.16 g/cm^3 olarak bulunmuştur. Numunelerin toplam gözenek oranı yaklaşık olarak aynı bulunmuştur.

%0,2 C ve %0,5 C ilaveli DistaloyAB tozlarından üretilen numunelerin optik mikroskop görüntüleri sırasıyla Şekil 1'de görülmektedir. Numunelerde homojen ve küçük gözenek yapısı görülmektedir. DistaloyAB tozunda bakır katı çözelti içinde bulunduğundan sinterleme sonrasında büyük ve düzensiz gözenek oluşturmamıştır [8].

Çizelge 2. Toz metal numunelerin yoğunluk ve toplam gözenek miktarı (Density and amount of total porosity of powder metal specimens)

Numune	Sinterleme sonrası yoğunluk (g/cm^3)	Toplam gözeneklilik oranı (%)
%0,2 C İlaveli DistaloyAB	7,16	9,24
%0,5 C İlaveli DistaloyAB	7,10	9,8



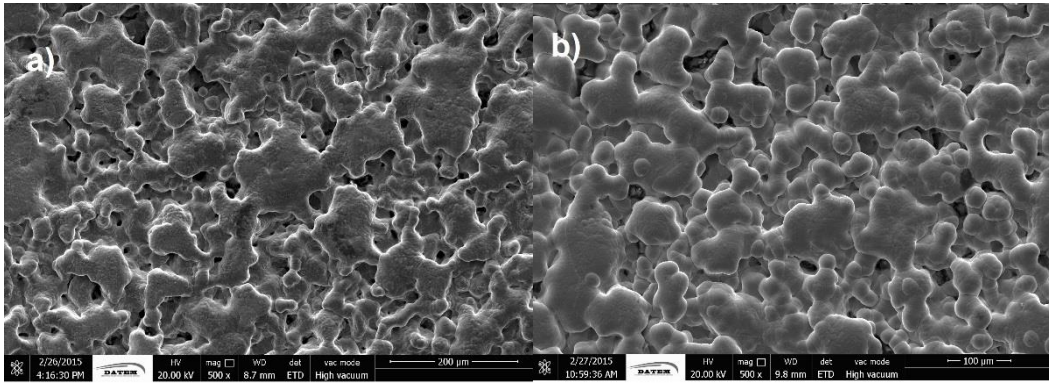
Şekil 1. DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış numunelerin 100X büyütmede optik mikroskop görüntüleri (a) %0,2 C ilaveli (b) %0,5 C ilaveli (Optical micrographs with 100X magnification of uncoated specimens made of DistaloyAB with (a) 0.2% C (b) 0.5% C)

Gözle muayenede kaplanan malzemelerin düzgün, homojen bir yapıda olduğu ve kaplama yüzeyinde düzensizlikler olmadığı görülmüştür. Kaplanan numunelerin SEM görüntüleri Şekil 2’de görülmektedir. Kaplamanın gözenekli yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 3’te görüldüğü gibi numunelerin yüzeyindeki kalıntı iç gerilme sonucu çatlaklar oluşmuş ve oluşan çatlakların yoğunluğunun, kaplamanın sertliğini, korozyon ve aşınma direncini etkilediği düşünülmektedir. Benzer çalışmalarda çatlak yoğunluğunun

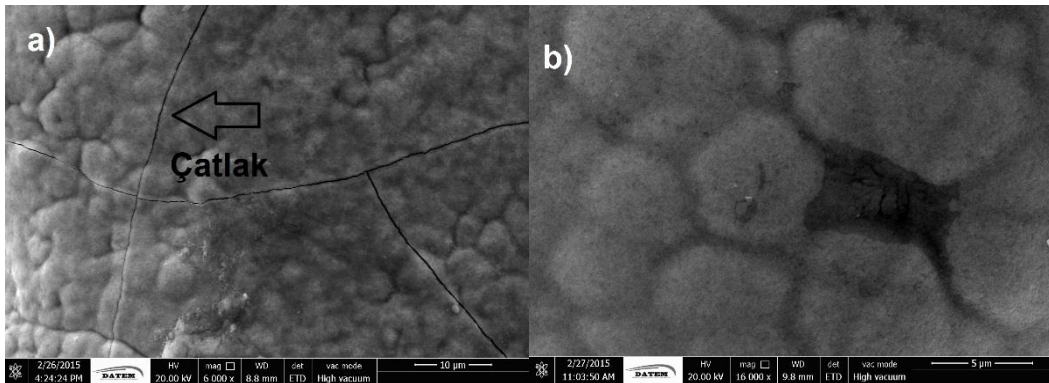
kaplamanın sertliğini, korozyon direncini ve aşınma direncini etkilediği bulunmuştur [9].

Kaplama kalınlığında bölgesel farklılıklar görülmektedir. Elektrolitik kaplama yapılan numunenin yüzeyindeki pürüzlülük, kaplama kalınlığının yer yer farklılık göstermesine neden olmuştur. Keskin köşe ve kenarlar, gibi ana malzeme yüzeyindeki farklılıklar, anoda olan mesafe farklılığı homojen akım yoğunluğu

kaplamanın sertliğini, korozyon direncini ve aşınma direncini etkilediği bulunmuştur [9].



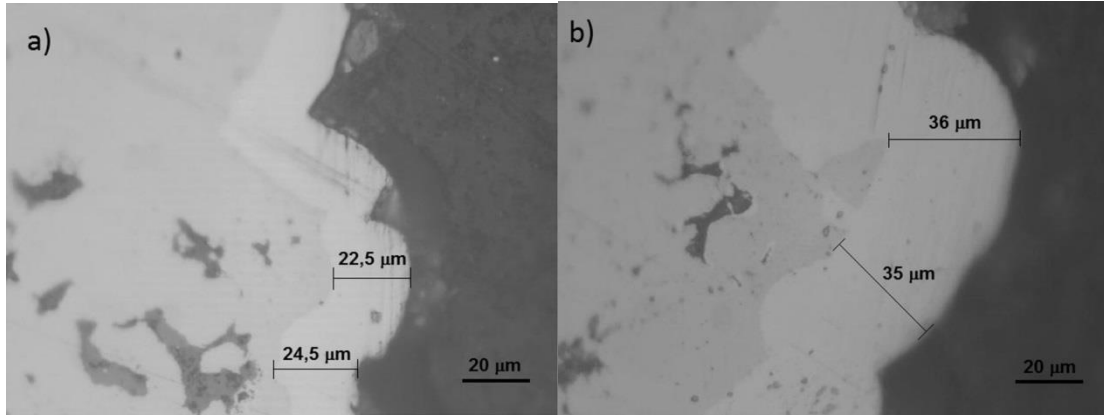
Şekil 2. DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmış numunelerin SEM görüntüleri (a) %0,2 C ilaveli (b) %0,5 C ilaveli (SEM images of coated specimens made of DistaloyAB with (a) 0.2% C (b) 0.5% C)



Şekil 3. DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmış numunelerin SEM görüntüleri (a) %0,2 C ilaveli (b) %0,5 C ilaveli (SEM images of coated specimens made of DistaloyAB with (a) 0.2% C (b) 0.5% C)

dağılımını önlemektedir. Bunun sonucu olarak kaplama kalınlığında düzensizlik olmaktadır.[10]

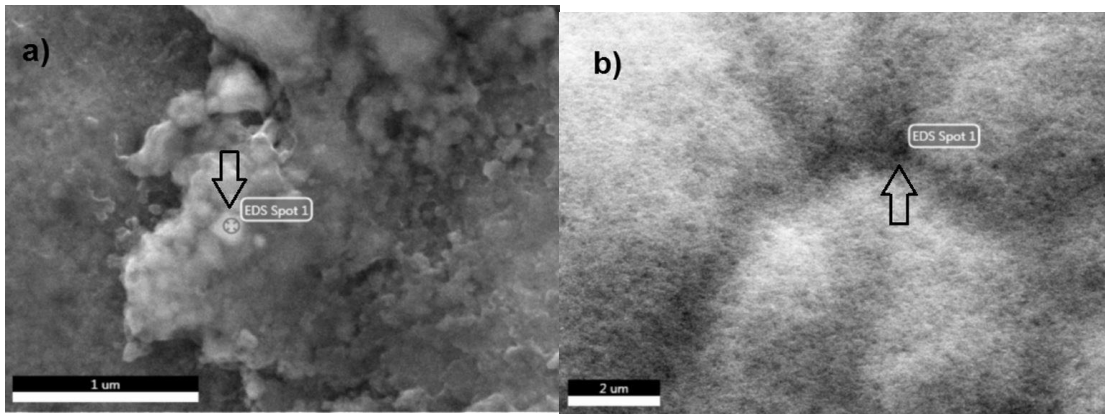
elementlerin tespiti beklenen bir sonuçtur. Farklı iki numunenin EDS analizlerinin sonuçlarında bir farklılık



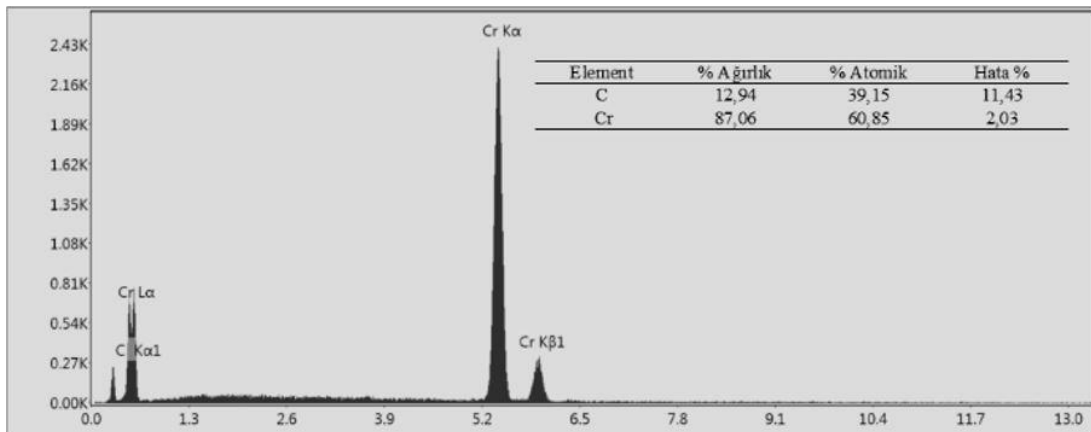
Şekil 4. DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmış numunelerin optik mikroskop görüntüleri (a) %0,2 C ilaveli (b) %0,5 C ilaveli (Optical micrographs of coated specimens made of DistaloyAB with (a) 0.2%C (b) 0.5%C)

Şekil 5'te her iki kaplanmış numuneden çekilen SEM görüntüsü görülmektedir. Şekil 6 ve Şekil 7'de her iki numuneden elde edilen SEM görüntülerinin nokta EDS analizinde Cr ve C elementleri belirlenmiştir. Bu

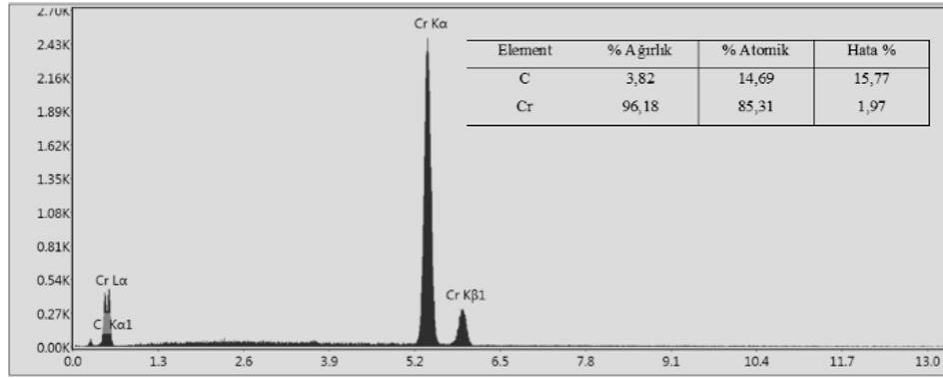
olmadığı anlaşılmaktadır. Ana malzemenin grafit oranındaki farklılığın kaplamaya herhangi bir etkisinin olmadığı bulunmuştur [10].



Şekil 5. a) % 0,2 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilmiş ve kaplanmış numunenin 120000 büyütme ile çekilen SEM görüntüsü (SEM image with 120000x magnification of coated specimen made of DistaloyAB with 0,2%C) b) % 0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilmiş ve kaplanmış numunenin 30000 büyütme ile çekilen SEM görüntüsü (SEM image with 30000x magnification of coated specimen made of DistaloyAB with 0,5%C)



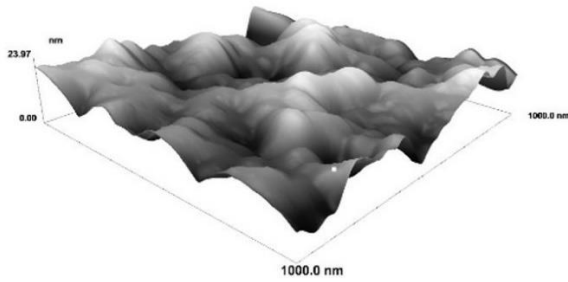
Şekil 6. % 0,2 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilmiş ve kaplanmış numunenin EDS analizi (EDS analysis of coated specimen made of DistaloyAB with 0,2%C)



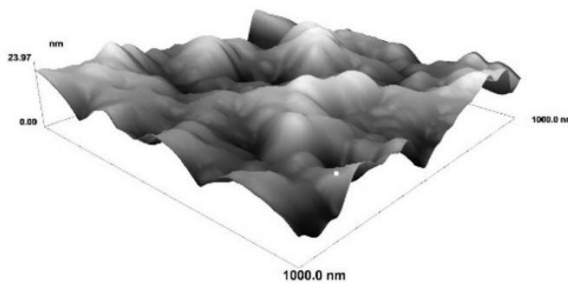
Şekil 7. % 0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilmiş ve kaplanmış numunenin EDS analizi (EDS analysis of coated specimen made of DistaloyAB with 0,5%C)

3.2 Atomik Kuvvet Mikroskobu Analizi (Atomic Force Microscopy Analysis)

AFM ile $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ alandaki 3 boyutlu görüntüleme yapılmıştır. Numunelere ait görüntüler Şekil 8 ve Şekil 9'da görülmektedir.



Şekil 8. % 0,2 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilmiş ve kaplanmış numunenin 3D AFM görüntüsü (3D AFM image of coated specimen made of DistaloyAB with 0,2%C)



Şekil 9. % 0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilmiş ve kaplanmış numunenin 3D AFM görüntüsü (3D AFM image of coated specimen made of DistaloyAB with 0,5%C)

Hesaplanan R_a ve RMS değerlerini gösteren Çizelge 3'te verilmiştir. Kaplamanın R_a ve RMS yüzey pürüzlülüğü değerleri AFM görüntülerinden yazılım kullanılarak hesaplanmıştır. Yapılan yüzey morfolojisi çalışmaları neticesinde Cr/NE kaplamaları, görüntülerden de anlaşılacağı gibi oldukça homojen ve

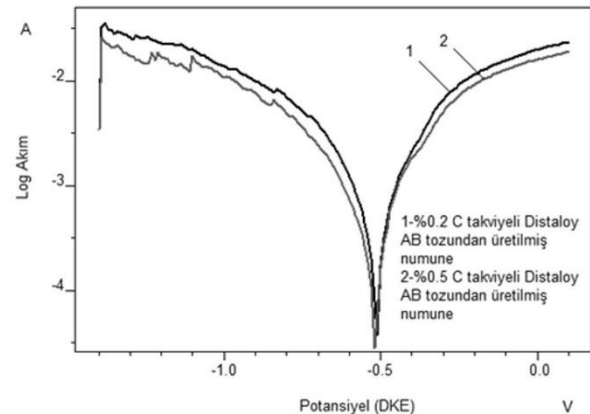
düzdün yüzeylere sahiptirler. Kaplamadaki pürüzlülüğe etki eden parametreler ana malzeme pürüzlülüğü ve banyodaki nanoelmas parçacıkların konsantrasyonudur. Ana malzemede grafit oranının değişmesinin kaplamaların pürüzlülüğüne bir etkisi olmamıştır.

Çizelge 3. Kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri (Surface roughness values of coated specimens)

Numune kodu	R_a (nm)	RMS (nm)
%0,2 C ilaveli DistaloyAB	3,18	4,01
%0,5 C İlaveli DistaloyAB	5,00	6,23

3.2 Korozyon Davranışı (Corrosion Behavior)

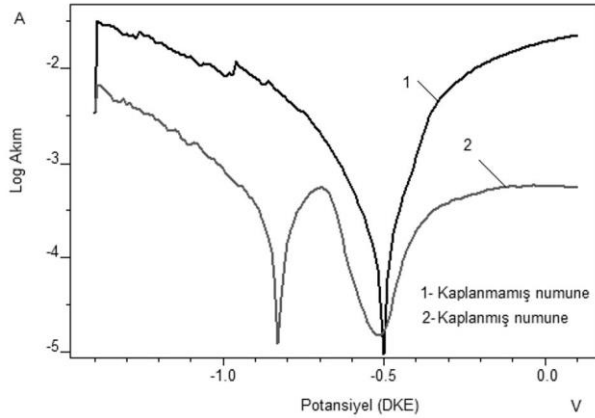
Kaplanmamış toz metal numunelerin, 0,1 M H_2SO_4 çözeltisindeki korozyon testi sonucundaki Tafel polarizasyon eğrileri, Şekil 10'da verilmektedir. Numunelerin Tafel eğrileri sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir. Numunelerin kaplanmamış durumdaki korozyon hızlarının hemen hemen aynı olduğu görülmüştür. 0,1M H_2SO_4 çözeltisinde zamana bağlı olarak, gözeneklerde korozyon ürünleri birikmesi muhtemeldir. Düşük yoğunlukta numunelerde gözenekler çok açıktır ve yüksek yüzey alanı nedeniyle korozyon hızı büyüktür [11].



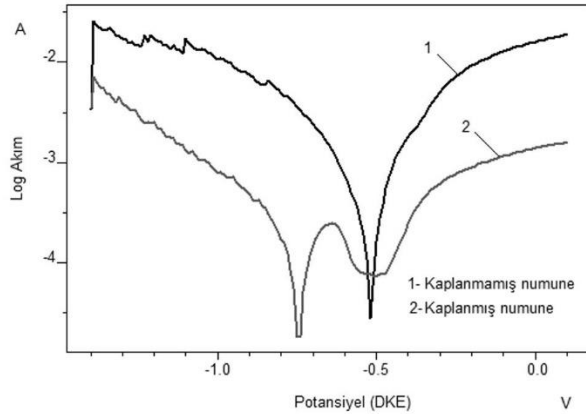
Şekil 10. 0,1 M H_2SO_4 çözeltisinde %0,2 C ve %0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of uncoated samples made of DistaloyAB with 0,2%C and 0,5%C in 0,1 M H_2SO_4 solution)

Çizelge 4. 0,2 C ve 0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış numunelerinin 0,1M H₂SO₄ çözeltisinde Tafel polarizasyon sonuçları (Tafel polarization results of uncoated samples made of DistaloyAB with 0,2%C and 0,5%C in 0,1 M H₂SO₄ solution)

Numune	Ekor (V)	Rp (Ohm)	β_a (V/dec)	β_k (V/dec)	Korozyon hızı (mm/yıl)
%0,2 C İlaveli DistaloyAB	-0,48	93,7	0,158	0,163	13,04
%0,5 C İlaveli DistaloyAB	-0,52	121,6	0,151	0,187	13,13



Şekil 11. 0,1M H₂SO₄ çözeltisinde %0,2 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of uncoated and coated samples made of DistaloyAB with 0,2%C in 0,1 M H₂SO₄ solution)



Şekil 12. 0,1M H₂SO₄ çözeltisinde %0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of uncoated and coated samples made of DistaloyAB with 0,5%C in 0,1 M H₂SO₄ solution)

Şekil 11'de ve Şekil 12'deki tafel polarizasyon eğrilerinde kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin katodik ve anodik dalları incelendiğinde; kaplanmış numunelerin, korozyon akım yoğunluğunda önemli oranda azalma olduğu görülmektedir.

Numunelerin Tafel eğrilerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 5 ve Çizelge 6'da verilmiştir. Buna göre nanoelmas ilaveli krom kaplama, hem %0,2 C ilaveli Distaloy AB tozundan üretilmiş numunene de hem de %0,5 C ilaveli Distaloy AB tozundan üretilmiş numunene de %57 oranında korozyondan koruma sağlamıştır. Her iki numune-de de kaplanmış numunelerin korozyona karşı direncinin arttığı anlaşılmaktadır. Buna göre, toz metalurjisiyle üretilmiş numunelerinin 0,1M H₂SO₄ çözeltisinde korozyon direncinin zayıf olduğu ancak üzerine yapılan nanoelmas krom kaplamaların korozyon direncini artırdığı görülmüştür. Cr kaplama çözeltisindeki nanoelmas parçacıklarının varlığı, metal matrisin mikroyapısını değiştirerek, korozyon direncini artırmaktadır [12].

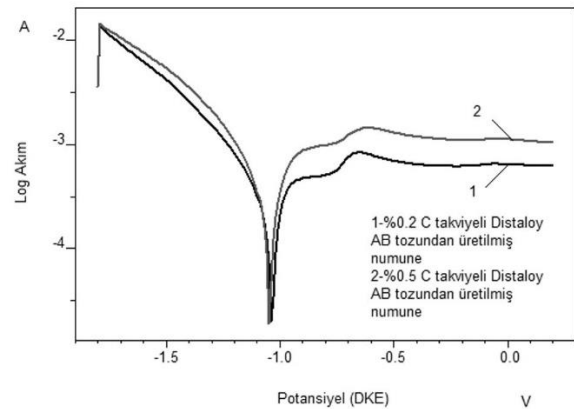
Çizelge 5. %0,2 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin 0,1M H₂SO₄ çözeltisinde Tafel polarizasyon sonuçları (Tafel polarization results of uncoated and coated samples made of DistaloyAB with 0,2%C in 0,1 M H₂SO₄ solution)

Numune	Ekor (V)	Rp (Ohm)	β_a (V/dec)	β_k (V/dec)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Kaplamasız	-0,48	93,7	0,158	0,163	13,04
Kaplamalı	-0,83	275,4	0,139	0,132	5,55

Çizelge 6. %0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin 0,1M H₂SO₄ çözeltisinde Tafel polarizasyon sonuçları (Tafel polarization results of uncoated and coated samples made of DistaloyAB with 0,5%C in 0,1 M H₂SO₄ solution)

Numune	Ekor (V)	Rp (Ohm)	β_a (V/dec)	β_k (V/dec)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Kaplamasız	-0,52	121,6	0,151	0,187	13,13
Kaplamalı	-0,74	446,5	0,176	0,157	5,709

Kaplanmamış toz metal numunelerin 0,1M NaOH çözeltisindeki korozyon testi sonrası Tafel polarizasyon eğrileri, Şekil 13'de Tafel eğrilerinden elde edilen sonuçlar ise Çizelge 7'de verilmiştir.



Şekil 13. 0,1M NaOH çözeltisinde %0,2 C ve %0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış

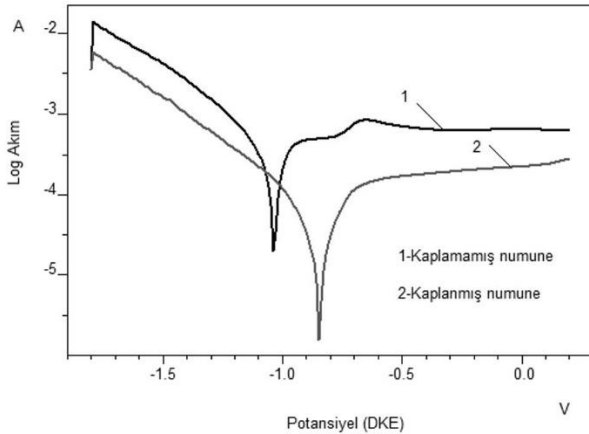
numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of uncoated samples made of DistaloyAB with 0,2%C and 0,5%C in 0,1 M NaOH solution)

Çizelge 7. %0,2 C ve %0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış numunelerin 0,1M NaOH çözeltisinde Tafel polarizasyon sonuçları (Tafel polarization results of uncoated samples made of DistaloyAB with 0,2%C and 0,5%C in 0,1 M NaOH solution)

Numune	Ekor (V)	Rp (Ohm)	β_a (V/dec)	β_k (V/dec)	Korozyon hızı (mm/yıl)
%0,2 C ilaveli DistaloyAB	-1,04	268,2	0,147	0,155	4,525
%0,5 C ilaveli DistaloyAB	-1,05	198,6	0,126	0,146	5,311

0,1 M NaOH ortamındaki numunelerin korozyon hızları pasifleşme nedeniyle, 0,1M H₂SO₄ ortamına kıyasla oldukça düşük çıkmıştır. %0,2 C ve %0,5 C ilaveli Distaloy AB tozundan üretilen toz metal numunelerinin kaplanmamış durumdaki korozyon hızları arasında önemli bir fark görülmemektedir.

Şekil 14 ve Şekil 15’de tafel polarizasyon eğrilerinde kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin tafel eğrileri karşılaştırılmış, Çizelge 8 ve Çizelge 9’da tafel eğrilerinden elde edilen sonuçlar verilmiştir.



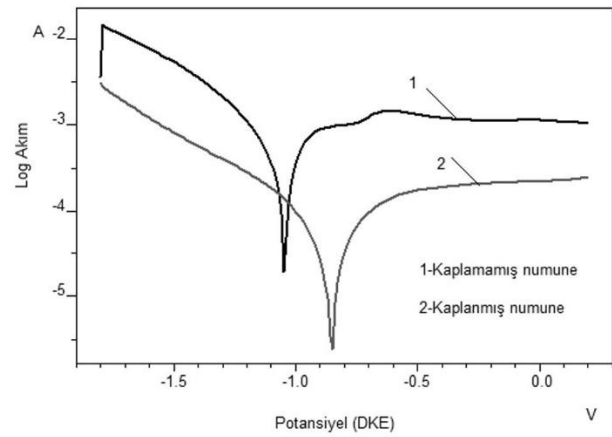
Şekil 14. 0,1M NaOH çözeltisinde %0,2 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of uncoated and coated samples made of DistaloyAB with 0,2%C in 0,1 M NaOH solution)

Çizelge 8’de görüldüğü gibi kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin korozyon hızları sırasıyla 4,525 ve 0,724 mm/yıl olarak bulunmuştur. Nanoelmas ilaveli krom kaplama bu ortamda %0,2 C ilaveli DistaloyAB toz

metalinden üretilen numuneler için %84 oranında koruma sağlamıştır.

Çizelge 8. %0,2 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin 0,1M NaOH çözeltisinde Tafel polarizasyon sonuçları (Tafel polarization results of uncoated and coated samples made of DistaloyAB with 0,2%C in 0,1 M NaOH solution)

Numune	Ekor (V)	Rp (Ohm)	β_a (V/dec)	β_k (V/dec)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Kaplamasız	-1,04	268,2	0,147	0,155	4,52
Kaplamalı	-0,85	1996	0,181	0,179	0,72



Şekil 15. 0,1M NaOH çözeltisinde %0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri (Tafel polarization curves of uncoated and coated samples made of DistaloyAB with 0,5%C in 0,1 M NaOH solution)

Çizelge 9. %0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin 0,1M NaOH çözeltisinde Tafel polarizasyon sonuçları (Tafel polarization results of uncoated and coated samples made of DistaloyAB with 0,5%C in 0,1 M NaOH solution)

Numune	Ekor (V)	Rp (Ohm)	β_a (V/dec)	β_k (V/dec)	Korozyon hızı (mm/yıl)
Kaplamasız	-1,05	198,6	0,126	0,146	5,311
Kaplamalı	-0,86	2212	0,284	0,234	0,931

Kaplanmamış ve kaplanmış numunelerin korozyon hızları sırasıyla 5,311mm/yıl ve 0,931 mm/yıl olarak bulunmuştur. Nanoelmas ilaveli krom kaplama bu ortamda %0,5 C ilaveli DistaloyAB toz metalinden üretilen numuneler için %82 oranında koruma sağlamıştır. Kromun soy kaplama olması ve kararlılığını koruyup, metal ile korozyona neden olan ortam arasında etkili bir engel oluşturması sayesinde malzemenin korozyon direnci artmıştır [13]. Benzer şekilde Nguyen

ve ark.(2009) AISI 1024 çeliğini krom ve nanoelmas ilaveli krom ile kaplamışlar, %3,5 NaCl ortamda nanoelmas ilaveli krom kaplamalı numunenin krom kaplı numunenin korozyon direncinin daha iyi olduğunu %86 oranında arttığını bulmuşlardır [14].

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS)

1. Bu çalışma ile araştırmalarda çelik numune üzerine uygulanan nanoelmas ilaveli krom kaplama işleminin, toz metal numune üzerine uygulanması sağlanmıştır. Yapılan kaplamanın numunelerin asidik ve bazik ortamlarda, korozyon direncini artırdığı anlaşılmıştır.
2. Toz metal numunelere yapılan nanoelmas ilaveli krom kaplama 0,1M H₂SO₄ çözeltisinde her iki numunede de %57 oranında korozyondan koruma sağlamıştır.
3. Toz metal numunelere yapılan nanoelmas ilaveli krom kaplama 0,1M NaOH çözeltisinde %0,2 C ilaveli Distaloy AB tozundan üretilmiş numunede %84, %0,5 C ilaveli Distaloy AB tozundan üretilmiş numunede ise %82 oranında korozyondan koruma sağlamıştır. Çalışmada ağırlıkça iki farklı karbon oranı ile çalışma yapılmasının nedeni kimyasal bileşimdeki grafit yüzdesinin kaplamanın korozyon direncine etkisinin araştırılmasıdır. Sonuçta grafit oranının korozyona direncine etkisinin olmadığı bulunmuştur.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma TÜBİTAK ve Bulgaristan Bilimler Akademisi (BAS) arasındaki ikili işbirliği programında yer alan 214M098 nolu proje ile desteklenmiştir. Ayrıca yazarlar Toz Metal A.Ş.'ye, Demiryolu Araştırma ve Teknoloji Merkezi İşletme Müdürlüğü'ne (DATEM) ve kaplama çalışmalarındaki yardımları için Dr. Nelly Gidikova, Dr. Vladimir Petkov ve Radoslav Valov'a teşekkür ederler.

5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Etaat, M., Emamy, M., Ghambari, M. and Fadaei, E., "Surface treatment and nickel plating of iron powder metallurgy parts for corrosion protection", *Materials and Design*, 30: 3560–3565, (2009).
2. Etaat, M., Emamy, M., Ghambari, M., and Fadaei, E. (2009). Surface treatment and nickel plating of iron powder metallurgy parts for corrosion protection. *Materials & Design*, 30(9): 3560-3565.
3. Vinokurov, E. G., Arsenkin, A. M., Grigorovich, K. V. and Bondar, V. V., "Electrodeposition and Physico-Mechanical Properties of Chromium Coatings Modified with Disperse Particles", *Protection of Metals*, 42: 290–294, (2006).
4. Gidikova, N., Cias, A., Petkov, V., Madej, M., Sułowski, M. and Valov, R., "Wear Resistant Chromium Coatings Modified with Diamond Nanoparticles", *Archives of Metallurgy and Materials*, 59: 1513-1516, (2014).
5. Isakov, V. P., Lyamkin, A. I., Nikitin, D. N., Shalimova, A. S. and Solntsev, A.V., "Structure and Properties of Chromium-Nanodiamond Composite Electrochemical Coatings", *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 46: 578-581, (2010).
6. Tikhonov, K. I., Burkat, G. K., Dolmatov, V. Y. and Orlova, E. A., "Use of Diamond Stock in Chromium Plating", *Russian Journal of Applied Chemistry*, 80: 1082-1086, (2007).
7. Nguyen, V., Hoang, T., Nguyen, N., Kwon, S., Kim, M. and Lee, J., "Cr/nanodiamond composite plating with cobalt cation additive", *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, 19: 975-978, (2009).
8. Bekoz, N. and Oktay, E., "The role of pore wall microstructure and micropores on the mechanical properties of Cu–Ni–Mo based steel foams", *Materials Science and Engineering: A*, 612: 387–397, (2014).
9. Beyragh, S., Asl, K. and Norouzi, S., "A comparative research on corrosion behavior of a standard, crack-free and duplex hard chromium coatings" *Surface & Coatings Technology*, 205: 2605–2610, (2010).
10. Kanani, N., Raj, L., Sathishkumar, J., Kumaragurubaran, B. and Gopal, P., *Electroplating: Basic Principles Processes and Practice* (1). The Netherlands: *Elsevier*, 1-213. (2004).
11. Sarıtaş, S., Türker, M. and Durlu, N. (Editörler), "Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri", *Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları*, 1-504, (2007).
12. Mandich, N. V. and Dennis, J. K., "Codeposition of Nanodiamond with Chromium", *Metal Finishing*, 99: 117-119, (2001).
13. Doruk, M., "Metalik Malzemeler ve Korozyon", *Korozyon Derneği*, 1-500, (2014).
14. Nguyen, V., Hoang, T., Nguyen, N., Kwon, S., Kim, M. and Lee, J., "Cr/nanodiamond composite plating with cobalt cation additive", *Transactions of Nonferrous Metals society of China*, 19: 975-978, (2009).

Isıl İşlemin Bazı Ağaç Malzemelerde Yüzey Pürüzlülüğü ve Vernik Yapışma Direncine Etkisi

Suat ALTUN*, Musa ESMER

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Endüstriyel Tasarım Mühendisliği Bölümü,
Demirçelik Kampüsü, 100. Yıl, Merkez, Karabük.
(Geliş/Received : 03.06.2016 ; Kabul/Accepted : 04.10.2016)

ÖZ

Son yılların en çok araştırılan konularından olan ısıtma işlemi görmüş ağaç malzemeler için de geleneksel üst yüzey malzemeleri kullanılmaktadır. Isıtma işlemi malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısında değişimlere neden olduğundan, geleneksel üst yüzey malzemelerinin katman performansını da etkileyeceği düşünülmektedir. Bu çalışmada ısıtma işlemi görmüş ağaç malzemesinde, yüzey hazırlık işleminin ve vernik çeşidinin, vernik yapışma direnci üzerine etkilerini belirlemek amaçlanmıştır. Thermowood yöntemi ile ısıtma işlemi görmüş Dişbudak (*Fraxinus excelsior* L.), Sarıçam (*Pinus sylvestris* Lipsky) ve İroko (*Chlorophora excelsa*) örneklerinin zımparalanmış ve rendelenmiş yüzeylerine; solvent bazlı sentetik esaslı, renk pigmentli yarı şeffaf vernik (HD), alkid bağlayıcı esaslı silikonlu vernik (SI), ürethan alkid kombinasyon esaslı tek bileşenli poliüretan (PÜ) vernik ve akrilik esaslı su bazlı vernik (AS) uygulanmış, yüzey pürüzlülüğünün ve vernik çeşidinin vernik yapışma direncine etkileri ortaya konmuştur. Isıtma işlemi görmüş örneklerde vernik yapışma direncinin genellikle daha düşük olduğu belirlenmiştir. En yüksek vernik yapışma direnci, poliüretan vernikte tespit edilmiştir. Sarıçam, iroko ve dişbudakta en yüksek yapışma direnci değerleri sırasıyla 4.98 MPa, 5.88 MPa, 6.61 MPa olarak, kontrol grubu rendelenmiş yüzeyde, poliüretan vernikte tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Isıtma İşlemi; Vernik Yapışma Direnci; Yüzey Pürüzlülüğü; Ahşap Vernikleri.

The Effect of Heat Treatment on The Surface Roughness and Varnish Adhesion of Wood

ABSTRACT

The same conventional varnishes which are produced for untreated wood are used for heat treated wood, which is a popular material in recent years, too. Heat treatment causes changes on chemical properties of wood and consequently on physical and surface properties of wood. Because of this, performance of these traditional varnishes can be different on the heat treated substrate. In this study, effects of surface machining and varnish types on the adhesion of varnishes on the heat treated wood were investigated. Planed and sanded heat treated iroko (*Chlorophora excelsa*), Scots pine (*Pinus sylvestris*) and ash (*Fraxinus excelsior* L.) wood surfaces were coated by using solvent base (HD), acrylic based waterborne (AS), alkyd based silicon-containing (SI) and urethane alkyd based one component polyurethane (PU) varnishes and varnish adhesion values were determined. The highest adhesion was determined in samples coated with polyurethane varnish. The highest adhesion values were 4.98 MPa, 5.88 MPa, 6.61 MPa in untreated, planed and coated with polyurethane varnish scots pine, iroko and ash, respectively.

Keywords: Heat Treated Wood, Varnish Adhesion, Surface Roughness, Wood Varnishes.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Ağaç malzeme, insanoğlunun ilk yıllarından bu yana pek çok alanda kullanılmaktadır. İlk yıllardan günümüze kadar yakacak, barınma, alet yapımı ve silah üretimi için hammadde ihtiyacını karşılayan ağaç malzeme, insanoğlunun teknolojik alanda yaptığı gelişmelerde önemli rol oynamıştır [1]. Orman alanlarının sürekli azalmasına karşılık, kişi başına düşen tüketimin artması, ağaç malzemenin faydalı kullanım süresinin daha uzun olmasını zorunlu hale getirmektedir. Olumsuz ortam koşullarına karşı ağaç malzeme yüzeyinin daha uzun süre dayanıklı kalmasını sağlamak amacıyla, malzemenin çeşitli koruyucu üst yüzey katmanları ile kaplanması en yaygın

yöntemdir [2]. Ağaç malzeme yüzeylerinin estetik ve ekonomik yönde kullanım süresini arttırmak amacıyla, koruyucu katman oluşturmada en çok tercih edilen maddeler ise boya ve verniklerdir. Literatürde boya ve verniklerin katman performanslarının incelendiği birçok çalışma bulunmaktadır. Vernik yapışma direnci de verniklerin kullanım alanını sınırlayan ve dolayısıyla da katman performansını değerlendirmek için kullanılan önemli parametrelerden birisidir [3,4]. Konu ile ilgili literatür bilgileri incelendiğinde; vernik çeşidinin verniklerin yüzeye yapışma direncindeki farklılığın en önemli etkeni olduğu söylenebilir [5-8]. Çeşitli su bazlı verniklerin yüzeye yapışma direnci değerlerinin solvent bazlı verniklere oranla daha düşük olduğu belirtilmiştir [5, 7-9]. Özdemir [6] 5 farklı ağaç türü ve 3 farklı vernik çeşidi kullandığı çalışmada, en yüksek yapışma

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: saltun@karabuk.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 231-239

direncinin akrilik vernikte, en düşük yapışma direncinin ise selülozik vernikte olduğunu belirtmiştir.

Kaygın [10] çalışmasında selülozik, sentetik ve akrilik esaslı opak boyalar kullanmış, vernik yapışma direncindeki değişimlerin ağaç malzemeden kaynaklanmadığını, esas değişimin boya türüne bağlı olduğunu ve sentetik boyada en yüksek değerlerin tespit edildiğini belirtmiştir. Ağaç malzemenin biyotik ve abiyotik etkenlere karşı dayanımını arttırmak için yapılan emprenye işleminin de vernik yapışma direnci üzerindeki etkileri araştırma konusu olmuştur. Özçifçi ve Özpak [11], Keskin ve ark. [12] Toker ve ark. [13] Protim WR-230, imersol aqua ve Tanalith-E ile emprenye işleminin vernik yapışma direncini önemli oranda azalttığını tespit etmişlerdir. Atar ve Peker [14] ise borlu bileşiklerle emprenye işleminin vernik yapışma direncini artırıcı etki yaptığını belirtmişlerdir.

Ağaç malzemenin azot veya benzeri inert bir gaz veya normal atmosfer ortamında, 100 °C - 250 °C arasında sıcaklığa belirli bir süre maruz bırakılması, ısı işlem olarak adlandırılmakta ve bir odun modifikasyon yöntemi olarak kabul edilmektedir [15]. Isıl işlemin en önemli amacı ağaç malzemede boyutsal stabilizasyonun sağlanması ve hiçbir koruyucu kimyasal madde kullanmaksızın odun dayanıklılığının artırılmasıdır. Yüksek sıcaklık etkisiyle odunun kimyasal yapısında meydana gelen değişimler malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli derecede etkiler. Isıl işlem sonrası özellikle eğilme direnci ve şok direnci başta olmak üzere mekanik özelliklerde düşüş meydana gelir [16, 17]. Isıl işlemin mekanik özellikler üzerindeki bu etkilerinin nedenleri üzerine detaylı tartışma Boonstra and Tjeerdsma [18] tarafından yapılmıştır. Isıl işlemin ağaç malzemenin fiziksel özellikleri üzerindeki ana etkisi ise denge rutubet miktarını düşürmesidir [19-22]. Isıl işlem gören odunda denge rutubetinin düşmesini Jamsa and Vitaniemi [23], ısı işlem sırasında hidroksil gruplarındaki azalmaya neden olan kimyasal değişiklikler ile daha az su molekülünün absorbe edilebilmesi ile açıklamaktadırlar. Diğer bazı araştırmalarda ise selülozun kristallik derecesinin artmasının da ısı işlem görmüş odundaki denge rutubet miktarı azalışında önemli rolü olduğu belirtilmektedir [18, 24, 25].

Isıl işlem görmüş ağaç malzemede denge rutubet miktarının azalması ile malzemenin daha hidrofobik bir özellik kazanması, malzemenin tutkal ve üst yüzey malzemeleri tarafından ıslatılabilme özelliklerini de etkilemektedir. Kocaefe ve ark. [26] ve Hakkou ve ark. [27] ısı işlem görmüş ağaç malzemenin ıslanma özelliklerini incelemiş ve malzemede oluşan bozunma bileşikleri nedeni ile malzemenin ıslanma özelliğinin düştüğünü belirtmişlerdir. Petric ve ark. [28] bazı ticari su bazlı vernik sistemleri ile yağ ile ısı işlem görmüş sarıçamın ıslanabilirliğini incelemişler, odun yüzeyinin hidrofobik karakterinin artmasına rağmen, dış ortam için hazırlanan su bazlı boyaların çok daha iyi ıslatabilme özelliği gösterdiğini belirlemişlerdir. Jamsa ve ark. [29] 5 yıl süre ile dış ortam koşullarına maruz bıraktığı ısı

işlem görmüş malzemelerde işlem görmemişlerle aynı çatlakların oluştuğunu ancak asit sertleştiricili vernik ve akrilik verniklerin ısı işlem görmüş odunda daha iyi sonuç verdiğini, akrilik vernikteki çatlak yoğunluğunun daha az olduğunu belirlemişlerdir.

Isıl işlem görmüş ağaç malzemede kullanılan verniklerin dış ortam koşullarındaki performansını inceleyen çalışmalar olsa da, bu çalışmalarda sonuç almak oldukça uzun sürmektedir. Vernik yapışma direnci ise çok daha kısa sürede karşılaştırılabilir sonuçlar alınmasını mümkün kılan üst yüzey katman performansı belirleme yöntemlerinden birisidir. Isıl işlem görmüş ağaç malzemede vernik yapışma direncine ilişkin az sayıda çalışma bulunmaktadır. Kesik ve Akyıldız [30] üç farklı sıcaklıkta, normal atmosfer basıncında, oksijensiz ortamda ısı işleme tabi tuttukları dört farklı ağaç malzemeye, çift bileşenli su bazlı verniğin yapışma direncini incelemişler, ısı işlem süre ve sıcaklığının artışı ile vernik yapışma direncinin düştüğünü, iğne yapraklı türlerde yapraklı ağaç türlerinden daha düşük olduğunu bildirmişlerdir. Yağlı ısı işlem görmüş sarıçamda ve göknarda su bazlı vernik katmanlarının performansının incelendiği çalışmalarda, bezir yağı ile ısı işlemem su bazlı verniğin yapışma direncini etkilemediği belirtilmiştir [31, 32].

Ağaç malzemeye uygulanan ısı işlem, malzemenin kimyasal yapısında dolayısıyla fiziksel yapısında ve yüzey özelliklerinde değişimlere neden olmaktadır. Bu nedenle geleneksel üst yüzey malzemelerinin ısı işlem görmüş malzemede performansı farklı olacaktır. Bu konuda çok az sayıda da olsa bazı çalışmalar yapılmış olmasına rağmen; ısı işlem yöntem ve parametrelerinin çok değişken olması, vernik sistem ve bileşenlerinin çeşitliliği, farklı vernik sistemlerinin ısı işlem görmüş ağaç malzemede yapışma direncine etkisinin tespit edilmesini önemli kılmaktadır. Bu çalışmanın amacı, ısı işlem görmüş sarıçam, dişbudak ve iroko ağaç malzemelerin rendelenmiş veya zımparalanmış yüzeylerinin pürüzlülüğünü ve bu yüzeylerde solvent bazlı vernik, alkid bağlayıcı esaslı silikonlu vernik, üretilen alkid kombinasyon esaslı tek bileşenli poliüretan vernik ve akrilik esaslı su bazlı verniklerin yapışma direnci değerlerini belirlemektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIALS and METHOD)

Yapılan çalışmada ağaç malzeme olarak Sarıçam (*Pinus Sylvestris Lipsky*), Dişbudak (*Fraxinus excelsior L.*), ve Iroko (*Chlorophora excelsa*) kullanılmıştır. Ağaç malzemeler ThermoWood® yetkili üreticisi olan Nova Orman Ürünleri San. Tic. A.Ş.'den temin edilmiştir.

Çalışmada kullanılacak ağaç malzeme lif kıvrıklığı, çatlak, budak, kurt yeniği, çürüklük vb. gibi odun kusurları bulunmayan kerestelerden seçilmiş ve her kerestenin yarısı ısı işlem öncesi kontrol numunesi olarak ayrılmıştır. Kerestelerin diğer yarısı odun türüne göre Nova Wood firmasının standart uygulama parametrelerine uygun olarak Thermo-D yöntemi ile ısı işleme

tabi tutulmuştur. Dişbudak 210 °C 2 saat, sarıçam 212 °C 1 saat, iroko 190 °C 1,5 saat ısıtılma tabi tutulmuştur.

Isıl işlem görmüş ve kontrol grubu kerestelerden 540x100x22 mm ölçülerinde taslak örnekler kesilmiş ve iklimlendirme dolabına (NÜVE ID 501) alınarak 20 ± 2 °C ve % 65 ± 5 bağıl nem koşullarında sabit ağırlığa ulaşınca kadar bekletilmiştir [33]. Daha sonra bu parçalar kalınlık makinesinde net olarak 20 mm kalınlıkta olacak şekilde iki yönlü rendelenmiştir. Rendeleme işleminde 1 mm talaş miktarı, 7 m/dak besleme hızı ve 6000 dev/dak kesici devri kullanılmıştır. Her bir ağaç türü için ısıtılma işlemi görmüş ve kontrol numuneleri ikiye ayrılmış ve yarısı rendelenmiş yüzey, yarısı zımparalanmış yüzey olacak şekilde gruplandırılmıştır. Rendelemiş grup olduğu gibi bırakılırken diğer grup silindri zımpara makinesinde 8 m/dak besleme hızında, 200 numara alüminyum oksit aşındırıcılı zımpara ile zımparalanmıştır. Her grup için iki adet numune hazırlanmıştır. Bu işlemin ardından rutubet farklılıklarını önlemek için örnekler iklimlendirme dolabına alınarak 20 ± 2 °C ve % 65 ± 5 bağıl nem ortamında iklimlendirilmiştir [33].

Sarıçam, dişbudak ve iroko odunlarından elde edilen numuneler dış ortam koşulları için üretilmiş 4 vernik ile verniklenmiştir. Çalışmada Hemel firmasından temin edilen solvent bazlı, sentetik esaslı, renk pigmentli, yarı şeffaf ahşap boyası (HD) [34, 11]; akrilik esaslı su bazlı renk ve ciladan oluşan su bazlı sistem (AS) [35, 36]; Favori boya firmasından temin edilen üretilen alkid reçine kombinasyon esaslı tek bileşenli poliüretan vernik (PÜ) [37] ve Filli Boya firmasından temin edilen alkid bağlayıcı esaslı silikonlu ahşap verniği (Sİ) [38] kullanılmıştır. Kullanılan verniklere ilişkin üretici firmalar tarafından sağlanan bilgiler Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Verniklerin bazı özellikleri (Some properties of varnishes)

	Yoğunluk	pH	Katı madde oranı (%)	Viskozite
HD	1 ± 0.02 g cm ⁻³	-	63 +-1	65 ± 2 sn DIN4 20 C
AS (Primer)	1018 g l ⁻¹	7.5	16	-
(Son kat)	1045 g l ⁻¹	8.4	37	-
PÜ	0.88- 0.94 g cm ⁻³	-	50-54	80 ± 5 sn ISO CUP6
Sİ	0.87- 0.91 g cm ⁻³	-	40-44	-

Örneklerin yüzey pürüzlülüğü tespit edildikten sonra, hazırlanan örnekler üretici firma tavsiyesi göz önünde bulundurularak vernikler uygulanmıştır. Poliüretan vernik fırça ile tek yüzeye % 10 sentetik tiner ile inceltirilerek 150± 5 g m⁻² olacak şekilde 3 kat; diğer vernikler fırça ile tek yüzeye 145 ± 5 g m⁻² olacak şekilde 2 kat uygulanmış, katlar arası 24 saat kuruma süresi sonrası 200 numara zımpara kâğıdı ile zımparalanmıştır. Örnekler vernikleme işleminden sonra 24 saat kurumaya bırakılmış, ardından iklimlendirme dolabına alınarak 20 ± 2 °C ve bağıl nemi % 65 ± 5 olan bir ortamda sabit ağırlığa gelinceye kadar bekletilmiştir.

Çalışmada kullanılan ısıtılma işlemi görmüş ve görmemiş ağaç malzemelerin hava kurusu yoğunlukları TS 2472 [39], rutubet miktarı TS2471 [33] standardı esaslarına uygun olarak tespit edilmiştir. Örneklerin yüzey pürüzlülüğü (Ra), TS6956 EN ISO 4287 [40] ve TS 971 [41] esaslarına uyularak, Mitutoyo SJ301 temaslı yüzey pürüzlülüğü test cihazı ile belirlenmiştir. Ölçümler, liflere dik yönde 20 mm aralıklarla, 2.5 mm örnek uzunluğu (λ) ve 5 örnek uzunluğu sayısı (cut-off) ile yapılmıştır. Isıl işlem görmüş ve kontrol numuneleri üzerindeki vernik katman kalınlıkları ASTM-D1005 [42] esaslarına uyularak 10 µm (mikron) hassasiyetle ölçüm yapabilen dijital komperatör (Instro 730-01-508) ile tespit edilmiştir.

Vernik yapışma direnci ölçümüne ASTM D 4541 [43] standardında belirtilen esaslara uyulmuştur. 500x100x20 mm boyutlarındaki her örnek yüzeyinden 5 adet ölçüm yapılmıştır. 20 mm çapındaki çelik yapışma direnci silindirleri, örneklerin ortasına gelecek şekilde çift bileşenli epoksi tutkalı ile yapıştırılmış ve örnekler normal şartlar altında 7 gün bekletilmiştir. Kopmanın tam vernik katmanından olmasını sağlamak amacıyla silindirlerin etrafındaki vernik katmanı bu iş için özel yapılmış aparat ile kesilmiştir. Daha sonra, Zwick/Roel® Universal test cihazı kullanılarak 5 mm dk⁻¹ çekme hızında test gerçekleştirilmiş ve vernik yapışma direnci aşağıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

$$X = 4F / \pi d^2 \text{ MPa} \quad (1)$$

Burada;

X : Vernik yapışma direnci (MPa)

F : Kopma anındaki kuvvet (N)

d : Deneysel silindiri çapı (mm)

Vernik yapışma direncine; ısıtılma işlemi, yüzey işlem

yöntemi ve vernik çeşidi faktörlerinin etkisini belirlemek için ağaç türlerinde ayrı ayrı olmak üzere, çoklu varyans analizi kullanılmış ve gruplar arası fark önemli çıktığında, LSD testi ile ortalama değerler arasındaki fark karşılaştırılmıştır. Diğer parametrelerden bağımsız olarak yüzey işlem yönteminin yüzey pürüzlülüğüne ve vernik yapışma direncine etkisini belirlemek için t testi kullanılmıştır. Diğer parametrelerden bağımsız olarak ısıtılma işlemi vernik yapışma direncine etkisini belirlemek için ise eşleştirilmiş örneklem t testi kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

Sarıçam, iroko ve dişbudak ağaç malzemelerin kontrol ve ısıt işlem görmüş örneklerinin hava kuru yoğunluk ve denge rutubet miktarı değerleri Çizelge 2’de verilmiştir. Isıt işlem her üç ağaç malzeme de yoğunluğun ve denge rutubet miktarının düşmesine neden olmuş ancak irokoda bu düşüş nispeten daha az olmuştur.

Isıt işlem görmüş ve görmemiş örneklerin, ortalama pürüzlülük değerleri ve her bir grup örnekte zımparalanmış yüzey ile rendelenmiş yüzeylerin arasındaki yüzey pürüzlülüğü değerine ait t testi sonuçları Çizelge 3’te verilmiştir.

kızılğaçta önemli derecede etkilemediğini ancak ardıç ve erikte ise azalttığını belirtmişlerdir. Karagöz ve ark. [46] sarıçamda 200 °C’de 2 saat ısıt işlemin yüzey pürüzlülüğünü azalttığını, kayın ve göknarda ise önemli derecede etkilemediğini bildirmişlerdir.

Çalışmada kullanılan verniklerin tespit edilen katman kalınlıkları üzerinde ağaç malzeme türü ve ısıt işlemin göz ardı edilebilecek kadar az etkili olduğu ve ortalama olarak PÜ vernikte 110 µm, HD ve Sİ verniklerde 60 µm, AS vernikte ise 50 µm olduğu belirlenmiştir. AS vernik katmanının ince olması vernik yapısındaki katı madde miktarının diğerlerine göre nispeten düşük olmasından kaynaklanmaktadır. PÜ vernikte katı madde oranı nispeten yüksek ve polimerizasyonun malzeme

Çizelge 2. Ağaç malzemelerin hava kuru yoğunluk ve denge rutubet miktarı değerleri (Air-dry density and moisture of content of the wood)

Ağaç Malzeme	Hava Kuru Yoğunluk (g cm ⁻³)		Denge Rutubet Miktarı (%)	
	Kontrol	Isıt işlem	Kontrol	Isıt işlem
Sarıçam	0.496	0.422	11.3	6.2
Iroko	0.588	0.576	11.8	8.3
Dişbudak	0.634	0.589	12.1	7.1

Çizelge 3. Sarıçam, iroko ve dişbudak ağaç malzemelerin ortalama yüzey pürüzlülüğü (Average surface roughness of the Scots pine, Iroko and Ash woods)

Ağaç Malzeme Türü	Isıt İşlem	Yüzey işlem	Yüzey Pürüzlülüğü (Ra)		P (α=0.05)
			Ra (µm)	S	
Sarıçam	Isıt İşlem	Rende	3.90	0.91	0.001*
		Zımpara	2.11	0.55	
	Kontrol	Rende	2.89	0.47	0.002*
		Zımpara	2.04	0.44	
Dişbudak	Isıt İşlem	Rende	3.28	0.67	0.006*
		Zımpara	2.37	0.51	
	Kontrol	Rende	3.36	0.88	0.001*
		Zımpara	1.54	0.42	
Iroko	Isıt İşlem	Rende	2.72	0.48	0.013*
		Zımpara	2.09	0.47	
	Kontrol	Rende	3.68	0.62	0.000*
		Zımpara	1.79	0.37	

Ra: Ortalama yüzey pürüzlülüğü, S: Standart sapma, P: t testi önemlilik değeri

Isıt işlem görmüş ve görmemiş tüm işlem gruplarında, rendeleme ve zımparalama yüzey işleminin ortalama yüzey pürüzlülüğünü istatistiksel olarak önemli derecede etkilediği tespit edilmiştir. Zımparalanan yüzeylerin ortalama pürüzlülüğü daha düşüktür. Isıt işlem dişbudak ve iroko ağaç malzemenin rendelenmiş yüzeyinde pürüzlülüğü azaltırken, sarıçamda artırmıştır. Kılıç ve ark. [44] da çalışmalarında zımparalanmış yüzeylerde planyalanmış yüzeylerden daha düşük pürüzlülük değeri elde ettiklerini belirtmişlerdir. Literatürde de ağaç malzeme türü ve ısıt işlem şartlarına bağlı olarak ısıt işlemin yüzey pürüzlülüğüne etkisine ilişkin farklı sonuçlar bildirilmiştir. Kesik ve ark. [45], 160 °C’de ısıt işlemin yüzey pürüzlülüğünü yalancı akasya ve

yüzeyinde tamamlanması nedeniyle kuru film katmanı diğer verniklere oranla daha kalındır [47]. Solvent bazlı HD vernikte katı madde oranının PÜ verniğine yakın olmasına rağmen, PÜ vernikten daha ince bir kuru film katmanı oluşmuştur.

Isıt işlem, yüzey işlem ve vernik çeşidine göre vernik yapışma direnci değerleri ağaç malzeme türleri için ayrı ayrı Çizelge 4.’de verilmiştir. Isıt işlem görmüş örneklerde vernik yapışma direncinin genellikle daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Isıt işlem ağaç malzemenin mekanik özelliklerini önemli derecede düşürdüğünden, yeterli adezyonun sağlandığı örneklerde malzeme yüzeyindeki liflerin daha kolay kopması bu sonuçta etkili olmuş olabilir. Isıt işlem görmüş dişbudak

ve sarıçam grupları dışında rendelenmiş yüzeylerde zımparalanmış yüzeylere oranla daha yüksek vernik yapışma direnci değerleri belirlenmiştir. Rendelenmiş yüzeylerde pürüzlülük daha yüksektir ve elde edilen sonuçlarla uyumlu olarak Söğütü *et al.* [9] ve Özdemir *et al.* [48] da çalışmalarında pürüzlülük artışı ile vernik yapışma direncinin arttığını tespit etmişlerdir. Çalışmalarında pürüzlülüğün artışı ile vernik ile malzeme arasındaki mekanik ve kimyasal bağlanmanın arttığını belirtmişlerdir. Sarıçam, iroko ve dişbudakta en yüksek yapışma direnci değerleri sırasıyla 4.98 MPa, 5.88 MPa, 6.61 MPa olarak, kontrol grubu rendelenmiş yüzeyde, poliüretan vernikte tespit edilmiştir. Ağaç malzeme türleri açısından değerlendirildiğinde vernik yapışma direnci, malzeme yoğunluğunun artışıyla paralel değişim göstermektedir. Atar ve ark. [49] beş farklı ağaç malzeme

göknaar gibi nispeten düşük yoğunluklu malzeme yüzeylerindeki (1.40-2.49 MPa) yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Vernik çeşidinin vernik yapışma direncine etkisine ait varyans analizi ağaç malzeme türleri için ayrı ayrı yapılmış, her üçünde de vernik çeşidinin vernik yapışma direnci üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir ($P < 0.05$). Vernik çeşidi bazında ikili karşılaştırma için yapılan LSD testi sonuçları Çizelge 5'te verilmiştir. Sarıçam ağaç malzeme vernik çeşidi, vernik yapışma direncini önemli derecede etkilemiştir. Her dört vernik çeşidinin de yapışma direnci istatistiksel olarak birbirinden farklıdır. En yüksek vernik yapışma direnci poliüretan vernikte iken, diğer verniklerin vernik yapışma direnci silikonlu, solvent bazlı ve su bazlı vernik sırasına göre azalmaktadır. Bu sıralama aynı zamanda vernik katman

Çizelge 4. İşlem, yüzey işlemi ve vernik çeşidine göre vernik yapışma direnci (Varnish adhesion according to heat treatment, surface machining and varnish type)

Ağaç Türü		Vernik yapışma direnci (MPa)						
İşlem Tipi	Yüzey İşlemi	Vernik çeşidi	Iroko		Sarıçam		Dişbudak	
			X	S	X	S	X	S
Kontrol	Zımpara	Solvent Bazlı	3.29	.476	2.74	.163	4.56	.433
		Su Bazlı	3.08	.444	2.71	.247	4.00	.308
		Poliüretan	4.55	.709	3.27	.211	5.60	.353
		Silikonlu	5.33	.558	3.31	.294	5.90	.325
	Rende	Solvent Bazlı	4.38	.328	3.25	.193	4.89	.180
		Su Bazlı	4.82	.254	3.55	.470	3.94	.590
		Poliüretan	5.88	.216	4.98	.472	6.61	.805
		Silikonlu	3.90	.551	3.22	.112	2.86	.535
Isıl İşlem	Zımpara	Solvent Bazlı	3.54	.572	2.45	.141	3.83	.158
		Su Bazlı	4.29	.880	2.98	.205	3.46	.438
		Poliüretan	4.12	.439	2.99	.218	5.74	.274
		Silikonlu	4.06	.326	2.86	.364	4.35	.197
	Rende	Solvent Bazlı	4.43	.406	3.42	.339	4.20	.283
		Su Bazlı	3.99	.171	1.59	.232	3.57	.275
		Poliüretan	4.75	.536	2.61	.223	5.17	.720
		Silikonlu	4.13	.179	3.19	.182	3.31	.404

X: Aritmetik ortalama, S:Standart Sapma

ve üç farklı vernik kullanarak yaptıkları araştırmalarında, çalışmamızda elde edilen bulguları destekleyen sonuçlar elde etmişlerdir. Kayın ve meşe gibi daha yüksek yoğunluktaki yapraklı ağaç malzeme yüzeylerindeki vernik yapışma direncinin (2.83-4.37 MPa) sarıçam ve

kalınlığı sıralamasına da uymaktadır. İroko da poliüretan vernik en yüksek yapışma direncine sahip iken, su bazlı ve silikonlu verniklerin yapışma direnci farklı değildir. Dişbudak ağaç malzeme vernik yapışma direnci değerlerinde de iroko ağaç malzemeye paralel

Çizelge 5. Vernik çeşidine göre vernik yapışma direnci ikili karşılaştırma sonuçları (Pairwise comparison of the varnish adhesion according to varnish type)

Ağaç Türü	Sarıçam		Iroko		Dişbudak	
	X	HG	X	HG	X	HG
AS	2.70	A	4.04	X	3.74	K
HD	2.96	B	3.91	X	4.36	L
Sİ	3.14	C	4.35	Y	4.10	L
PÜ	3.46	D	4.82	Z	5.78	M
LSD ±	0.144		0.253		0.298	

X: Aritmetik ortalama, HG: Homojenlik grubu ($\alpha=0,05$)

sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek vernik yapışma direnci poliüretan vernikte iken, solvent bazlı ve silikonlu vernikler arasında fark yoktur. En düşük değer su bazlı verniktedir.

Vernik yapışma direnci değerleri incelendiğinde, her üç ağaç malzeme için de poliüretan verniğin en yüksek değerlere sahip olduğu ve diğerlerine oranla belirgin şekilde yüksek olduğu belirlenmiştir. Tutgun [50] da yüzey pürüzlülüğünün vernik yapışma direncine etkisine ilişkin çalışmada, kullandığı vernikler arasında en yüksek yapışma direncinin poliüretan vernikte, en düşük su bazlı vernikte olduğunu belirtmiştir. Bu durumun poliüretan verniklerin reaksiyonlarını ağaç malzeme yüzeyinde tamamlamalarından kaynaklandığı ve bu nedenle daha yüksek vernik yapışma direnci değerleri verdiği şeklinde açıklanmaktadır [1, 51]. Budakçı [52]

yüzeyindeki bağlanma diğer vernik türlerine göre daha zayıf olarak gerçekleşmiştir. Atar ve ark. [49] da çalışmalarında ısıtılmış işlem görmüş sarıçam ağaç malzeme su bazlı vernik yapışma direncini 2.21 MPa, kontrol grubunda 2.95 MPa olarak tespit ettiklerini bildirmekte ve bu sonucu desteklemektedirler.

Literatürdeki hemen hemen tüm çalışmalarda ağaç türünün ve vernik çeşidinin yapışma direnci üzerinde önemli etkisi olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle baskın şekilde etkili olan bu faktörlerin etkisi dışında, yalnızca yüzey işlem yönteminin vernik yapışma direnci üzerindeki etkisini tespit etmek için zımparalanmış ve rendelenmiş yüzeylerdeki vernik yapışma direnci t testi ile karşılaştırılmış ve sonuçları Çizelge 6' da verilmiştir.

Solvent bazlı vernikte dışbudak kontrol grubu dışındaki gruplarda istatistiksel fark tespit edilmiştir. Kontrol

Çizelge 6. Ağaç malzeme, ısıtılmış işlem ve vernik çeşidine göre yüzey işlem faktörünün vernik yapışma direncine etkisi (The effect of surface machining on the varnish adhesion according to wood species, heat treatment and varnish type)

Ağaç türü	İşlem tipi	Yüzey İşlemi	Solvent Bazlı		Su Bazlı		Poliüretan		Silikonlu	
			X	P	X	P	X	P	X	P
Iroko	K	Z	3.29		3.08		4.55		5.33	
		R	4.38	0.009*	4.82	0.009*	5.88	0.009*	3.90	0.009*
	İ	Z	3.54		4.29		4.12		4.06	
		R	4.43	0.016*	3.99	0.117	4.75	0.094	4.13	0.53
Sarıçam	K	Z	2.74		2.71		3.27		3.31	
		R	3.25	0.009*	3.55	0.009*	4.98	0.009*	3.22	0.465
	İ	Z	2.45		2.98		2.99		2.86	
		R	3.42	0.009*	1.59	0.009*	2.61	0.036*	3.19	0.076
Dışbudak	K	Z	4.56		4.00		5.60		5.90	
		R	4.89	0.117	3.94	0.834	6.61	0.047*	2.86	0.009*
	İ	Z	3.83		3.46		5.74		4.35	
		R	4.20	0.028*	3.57	0.465	5.17	0.117	3.31	0.009*

K: Kontrol; İ: Isıl işlem; Z: Zımparalı yüzey; R: Rendelenmiş yüzey; X: Ortalama vernik yapışma direnci (MPa); P: t testi önemlilik değeri; *: istatistiksel olarak önemli ($\alpha=0.05$)

da çeşitli vernikler ile farklı katman kalınlıkları oluşturacak şekilde değişik ağaç türleri üzerinde yaptığı çalışmada, polimerik esaslı verniklerde katman kalınlığı artışının vernik yapışma direnci değerini artırıcı etki yaptığını belirtmiştir. Kaygın [10] da çeşitli ağaç malzeme yüzeylerine farklı opak boyalar uyguladığı çalışmada, yapışma direncindeki değişimlerin ağaç malzemeden kaynaklanmadığını, esas değişimin boya türüne bağlı olduğunu belirlemiştir. Su bazlı vernikte yapışma direncinin düşük olması, ısıtılmış işlem gören ağaç malzeme meydana gelen kimyasal değişimler sonucunda ıslanma özelliğinin düşmesine [26] bağlanabilir. Mekanik adezyon, yapıştırıcı veya verniğin malzemenin yüzeyine uygulanmasını ve bu yüzeyi ıslatmasını gerektirmektedir [53]. Isıl işlem sonrası malzeme hidrofili özelliğinin düşmesine bağlı olarak, su bazlı vernikler yüzeyi yeterince ıslatamamış ve yeterli mekanik adezyonu sağlayacak derecede nüfuz edememiştir. Bu nedenle vernik katmanı ile malzeme

gruplarında zımparalama işleminin daha etkili olduğu söylenebilir. Vernik çeşidi ve ağaç malzeme türüne bağlı bazı farklılıklar olsa da, çoğunlukla rendelenmiş yüzeylerdeki vernik yapışma direnci, zımparalanmış yüzeylerinkinden daha yüksek çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değerleri ile birlikte değerlendirildiğinde, rendeli yüzeylerde pürüzlülüğün daha fazla olduğu, bu nedenle de vernik ile malzeme yüzeyi arasındaki temas alanı artışının, mekanik adezyon vasıtası ile vernik yapışma direncini arttırdığı söylenebilir. Ancak mekanik adezyondaki bu artış pürüzlülüğün artışı ile doğru orantılı olarak devam etmemektedir. Dışbudak örnekleri ile sarıçam ve iroko ısıtılmış işlem gruplarında olduğu gibi yüzey pürüzlülüğü 3 mikronun üzerine çıktığında, vernik yapışma direncinde artış değil, bir düşüş gözlenmektedir. Budakçı ve Sönmez [7] iyi bir yapışma için yüzey pürüzlülüğünün azaltılmasını ve üst yüzey film katmanı ile malzeme temas yüzeyindeki havanın aradan çıkarılması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda

yüze pürüzlülüğü artışı ile mekanik bağlanmanın artışı ancak belirli sınırlar içerisinde sağlanabilmektedir.

Ağaç malzeme türü ve yüze işlem türünden bağımsız olarak, yalnızca ısıl işlemin vernik yapışma direnci üzerindeki etkilerini belirlemek için yapılan, eşleştirilmiş örneklem t testi sonuçları Çizelge 7’de verilmiştir. Isıl

ıslanabilirliğinin düşmesinin yanı sıra mekanik özelliklerinde meydana gelen değişikliklere de bağlanabilir. Literatürde malzeme yüzeyinde ve özellikle özışını paransim hücrelerinde meydana gelen deformasyonların, mikro çatlakların malzemenin lifleri arasındaki çekme dayanımını da düşürdüğü

Çizelge 7. Ağaç türü, yüze işlemi ve vernik çeşidine göre ısıl işlem faktörünün vernik yapışma direncine etkisi (The Effect of heat treatment on the varnish adhesion according to wood species, surface machining and varnish type)

Ağaç türü	Yüze işlemi	İşlem tipi	Solvent Bazlı		Su Bazlı		Poliüretan		Silikonlu	
			X	P	X	P	X	P	X	P
Iroko	Z	K	3.29	0.55	3.08	0.077	4.55	0.277	5.33	0.006*
		İ	3.54		4.29		4.12		4.06	
	R	K	4.38	0.497	4.82	0.007*	5.88	0.016*	3.90	0.47
		İ	4.43		3.99		4.75		4.13	
Sarıçam	Z	K	2.74	0.003*	2.71	0.211	3.27	0.12	3.31	0.098
		İ	2.45		2.98		2.99		2.86	
	R	K	3.25	0.488	3.55	0.001*	4.98	0.001*	3.22	0.757
		İ	3.42		1.59		2.61		3.19	
Dişbudak	Z	K	4.56	0.011*	4.00	0.125	5.60	0.535	5.90	0.001*
		İ	3.83		3.46		5.74		4.35	
	R	K	4.89	0.019*	3.94	0.234	6.61	0.012*	2.86	0.184
		İ	4.20		3.57		5.17		3.31	

K: Kontrol; İ: Isıl işlem; Z: Zımparalı yüzey; R: Rendelenmiş yüzey; X: Ortalama vernik yapışma direnci (MPa); P: Eşleştirilmiş örneklem t testi değeri; *: önemli ($\alpha=0.05$)

işlemin diğer faktörlerden bağımsız olarak vernik yapışma direnci üzerindeki etkisi, ağaç türü, yüze işlem ve vernik çeşidine göre farklılık göstermektedir. Isıl işlem görmüş yüzeylerdeki vernik yapışma direnci genellikle daha düşük olmasına rağmen, istatistiksel anlamda önemli farklar yalnızca bazı gruplarda tespit edilmiştir. Isıl işlem solvent bazlı verniğin yapışma direncini, dişbudakta her iki yüzeyde de ve sarıçam zımparalanmış yüzeyde önemli derecede etkilerken, rendeli yüzeyindeki ve irokoda her iki yüzeyde de etkilememiştir. Su bazlı verniğin yapışma direnci üzerinde ısıl işlem, yalnızca iroko ve sarıçamın rendeli yüzeylerinde etkili olmuştur. Poliüretan verniğin yapışma direnci, ısıl işlemle her üç ağaç malzemenin de rendeli yüzeylerinde önemli derecede etkilenirken, zımparalı yüzeylerinde etkilenmemiştir. Isıl işlem silikonlu vernikte yalnızca iroko ve dişbudak zımparalı yüzeylerde önemli farka neden olmuştur. Bu sonuçlar rendeli yüzeylerde pürüzlülüğün daha yüksek olduğu bilgisi ve vernik katman kalınlıkları ile birlikte değerlendirildiğinde, PÜ vernikte olduğu gibi daha kalın katman kalınlığı söz konusu olduğunda, yüze pürüzlülüğü düştükçe ısıl işlemin yapışma direnci üzerindeki etkisinin de azaldığını göstermektedir. Nispeten ince vernik katmanları ısıl işlemin yanı sıra, işleme yönteminden kaynaklanan yüze pürüzlülüğünden de daha fazla etkilenmektedir.

Isıl işlem sonrası vernik yapışma direnci değerlerindeki düşüş, malzemenin kimyasal yapısında meydana gelen değişiklikler sonucu yoğunluğunun, denge rutubetinin ve

belirtilmektedir [49]. Çekme dayanımındaki bu düşüşün, vernik yapışma direnci değerlerini de olumsuz yönde etkilediği düşünülmektedir

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER (CONCLUSION and RECOMMENDATIONS)

Araştırmada ısıl işlem görmüş ağaç malzeme, yüze hazırlık işleminin ve vernik çeşidinin, vernik yapışma direnci üzerine etkilerini belirlemek amaçlanmıştır. Thermowood yöntemi ile ısıl işlem görmüş dişbudak, sarıçam ve iroko örnekleri ve kontrol örneklerinin; zımparalanmış ve rendelenmiş yüzeylerine; dört tür vernik (solvent bazlı vernik, silikonlu vernik, poliüretan vernik ve su bazlı vernik) uygulanmış ve vernik yapışma direnci değerleri belirlenmiştir.

Araştırmada, ısıl işlemin malzemenin hem yoğunluğunu hem de denge rutubet miktarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Yüze işlem metodunun etkisi değerlendirildiğinde, her üç ağaç malzeme türünde de, hem ısıl işlem görmüş, hem de görmemiş örneklerde, 200 numaralı zımpara ile zımparalanmış yüzeylerin, rendelenmiş yüze ortalama pürüzlülüğünden önemli derecede düşük olduğu belirlenmiştir. Isıl işlem, vernik katman kalınlığını önemli derecede etkilememiştir. Bu sonuçlar ışığında vernik katman kalınlığını etkileyen en önemli faktörün, vernik çeşidi olduğu söylenebilir.

Isıl işlem görmüş örneklerde vernik yapışma direncinin genellikle daha düşük olduğu; ısıl işlem görmüş dişbudak ve sarıçam grupları dışında rendelenmiş yüzeylerde

zımparalanmış yüzeylere oranla daha yüksek vernik yapışma direnci değerleri tespit edilmiştir. Yüzey işlem faktörü dikkate alındığında, yüzey pürüzlülüğü tüm gruplarda farklı olmasına rağmen, vernik yapışma direncinde ağaç türü ve vernik çeşidine göre farklı sonuçlar elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün vernik yapışma direncini sarıçamda daha fazla etkilediği görülse de, vernik çeşidi veya ısıl işlem grupları için genelleme yapılabilecek sonuçlar görülmemiştir. Yüzey pürüzlülüğünün artışı belirli sınırlar içerisinde vernik yapışma direncinde de artışa neden olmuştur. Her üç ağaç malzemesinde de en yüksek yapışma direnci poliüretan vernikte tespit edilmiştir. Su bazlı verniğin en düşük yapışma direncine sahip olduğu söylenebilir.

Isıl işlem görmüş ve görmemiş ağaç malzemesinde farklı verniklerin, vernik yapışma direnci benzer sonuçlar ortaya koymuştur. Vernik yapışma direncinin daha çok verniğin yapısına ve katman kalınlığına bağlı olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler ışığında vernik yapışma direnci açısından en iyi sonucu veren poliüretan verniğin kullanılması önerilir. Özellikle zemin döşeme, kent mobilyaları gibi mekanik etkilere maruz kalacak ürünlerde poliüretan verniğin kullanılması daha uygun olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü Tarafından KBÜ-BAP-14/2-YL-030 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir

KAYNAKLAR

- Budakçı M., "Pnomatik adezyon deney cihazı tasarımı, üretimi ve ahşap verniklerinde denenmesi", *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003).
- Highley T. L., Kicle T. K., "Biological Degradation of Wood", *Phytopathology* 69: 1151-1157, (1990).
- Atar M., Keskin H., Yavuzcan H.G., "Varnish Layer Hardness of Oriental Beech (Fagus Orientalist L.) Wood as Affected by Impregnation and Color Bleaching", *Journal of Coatings Technology*, 1(3): 219-224, (2004).
- Atar M., Çolakoğlu M. H., "Surface Adhesion Strength of Varnishes in Impregnated Woods", *Journal of Applied Science*, 9(22): 4066-4070, (2009).
- Yakın M., "Su bazlı verniklerde sertlik, parlaklık ve yüzeye yapışma mukavemetinin tespiti", *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2001).
- Özdemir T., "Türkiye'de yetişen bazı ağaç türlerinde verniklerin özelliklerinin araştırılması", *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2003).
- Budakçı M., Sönmez A., "Bazı ahşap verniklerin farklı ağaç malzeme yüzeylerindeki yapışma direncinin belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 25(1): 111-118, (2010).
- Demirci Z., Sönmez A., Budakçı M., "Effect of thermal ageing on the gloss and the adhesion strength of the wood varnish layers," *BioResources*. 8(2): 1852-1867, (2013).
- Söğütü C., Nzokou P., Koç I., Tutgun R., Döngel N., "The effects of surface roughness on varnish adhesion strength of wood materials", *Journal of Coatings Technology and Research*, 13: 863-870, (2016).
- Kaygın B., "Ahşap Yüzeylerde kullanılan opak boyaların dayanım özellikleri", *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1997).
- Özçifçi A., Özpak S., "Impacts of impregnation solutions on the adhesion strength of outer usage varnish coatings", *Construction and Building Materials*, 22(4): 513-520, (2008).
- Keskin H., Atar M., Korkut S., Korkut D. S., "Impacts of Impregnation with Imersol-Aqua on Surface Adhesion Strength of Synthetic, Acrylic, Polyurethane and Waterborne Varnishes", *Pigment & Resin Technology*, 40 (3): 154-160, (2011).
- Toker H., Özçifçi, A., Hiziroglu. S., "Influence of weathering on adhesion strength of chemically treated and coated Scotch Pine", *Progress in Organic Coating*, 73: 211-214, (2012).
- Atar M., Peker H., "Effects of impregnation with boron compounds on the surface adhesion strength of varnishes used woods", *African Journal of Environmental Science and Technology*, 4(9): 603-609, (2010).
- Yıldız S., "Isıl işlem uygulanan doğu kayını ve doğu ladini odunlarının fiziksel, mekanik, teknolojik ve kimyasal özellikleri", *Doktora Tezi*, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002).
- Özçifçi A., Altun S., Yapıcı F., "Isıl işlem uygulamasının ağaç malzemenin teknolojik özelliklerine etkisi" *In. 5.Ulusal Arası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, 1171-1175, (2009).
- Yapıcı F., Esen R., Yörür H., Likos L., "The effects of heat treatment on the modulus of rupture and modulus of elasticity of scots pine (*Pinus sylvestris L.*) wood", *e-Journal of New World Sciences Academy*, 8(1): 1-6, (2012).
- Boonstra M. J., Tjeerdsma B., "Chemical analysis of heat-treated soft woods", *Holz als Roh und Werkstoff*, 64(3): 204-211, (2006).
- Ates S., Akyıldız M. H., Özdemir H., "Effect of Heat Treatment on Calabrian Pine (*Pinus brutia Ten.*) Wood", *BioResources*, 4(3): 1032-1043, (2009).
- Esteves B. M., Pereira H. M., "Wood modification by heat treatment: A review", *BioResources*, 4(1): 370-404, (2009).
- Militz H., "Heat treatment of wood: European process and their background". *Int Research Group Wood Protection, Section-4 Processes*, No:IRG/WP 02-40241, (2002).
- Tjeerdsma B. F., Boonstra M., Pizzi A., Tekely P., Militz H., "Characterisation of thermally modified wood: molecular reasons for wood performance improvement", *Holz Roh-und Werkstoff*, 56: 149-153, (1998).
- Jamsa S., Viitaniemi P., "Heat treatment of wood – Better durability without chemicals. In: Review on heat treatments of wood", *COST Action E22, EUR 19885*, 17-22, (2001).
- Wikberg H., Maunu S., "Characterisation of thermally modified hard and softwoods by ¹³C CPMAS NMR", *Carbohydrate Polymer*, 58: 461-466, (2004).

25. Bhuiyan T., Hirai N., “Study on crystalline behaviour of heat treated wood cellulose during treatments in water”, *Journal of Wood Science*, 51: 42-47, (2005).
26. Kocacafe D., Poncsak S., Dore G., Younsi R., “Effect of heat treatment on the wettability of White ash and soft mapple by water”, *Holz Roh und Werkstoff*, 66(5): 355-361, (2008).
27. Hakkou M., Petrissians M., Zoulalian A., Gerardin P., “Investigation of wood wettability changes during heat treatment on the basis of chemical analysis”, *Polymer Degradation and Stability*, 89: 1-5, (2005).
28. Petric M., Knehtl B., Krause A., Militz H., Pavlic M., Petrissians M., Rapp A., Tomazic M., Welzbacher C., Gerardin P., “Wettability of waterbourne coatings on chemically and thermally modified pine wood”, *Journal of Coating Technology Research*, 4(2): 203-206, (2007).
29. Jamsa S., Ahola P., Viitaniemi P., “Long term natürel weathering of coated Thermowood”, *Pigment Resin Tehnology*, 29(2): 68-74, (2000).
30. Kesik H. İ., Akyıldız M. H., “Effect of the Heat Treatment on the Adhesion Strength of Water Based Wood Varnishes”, *Wood Research*, 60(6): 987-994, (2015).
31. Kesik H. İ., Vurdu H., Çağatay K., Özkan O. E., Öncel M., “Yağlı Isıl İşlem Görmüş Sarıçam Odununda Koruyucu Katmanların Yapışma ve Sertlik Özellikleri”, *Kastamonu Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*, 15(2): 261-266, (2015).
32. Kesik H. İ., Vurdu H., Öncel M., Özkan O. E., Çağatay K., Aydoğan H., “The effects of varnish and paint coatings on oil heat Treated Turkish fir wood”, *In. Proceedings of the 27th International Conference Research for Furniture Industry*, Ankara, 98-104, (2015).
33. TS 2471, “Odunda, fiziksel ve mekaniksel deneyler için rutubet miktarı tayini”, (1976).
34. <http://www.hemel.com.tr/content/media/document/MSDS-HEMEL-HICKSON-DECOR-PLUS-WOODSTAIN-CESITLI-RENKLER.pdf>
35. <http://www.hemel.com.tr/content/media/document/MSDS-HI2014.pdf>
36. <http://www.hemel.com.tr/content/media/document/MSDS-HF-2044.pdf>
37. <http://www.faworiboya.com.tr/Upload/ProductOrjinal/44/fawori%20marin%20yat%20vernük%20msds.PDF>
38. https://www.filliboya.com/upload/CmsBrand/BrandContentFile/CAPAROL_HOLZSCHUTZLASUR_MSDS_TR.pdf
39. TS 2472, “Odunda, fiziksel ve mekaniksel deneyler için birim hacim ağırlığı tayini”, (1976).
40. TS6956 EN ISO 4287, “Geometrik mamul özellikleri (gmö) - Yüzey yapısı: Profil metodu - Terimler, tarifler ve yüzey yapısı parametreleri”, (2004).
41. TS 971, “Yüzey pürüzlülüğü-parametreler ve pürüzlülük tespiti kuralları”, (1988).
42. ASTM D 1005-95, “Standard Test Method for Measurement of Dry-Film Thickness of Organic Coatings Using Micrometers”, (2013).
43. ASTM D-4541, “Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers”, (2009).
44. Kılıc M., Hızıroğlu S., Burdurlu E., “Effect of machining on surface roughness of wood”, *Building and Environment*, 41: 1074-1078, (2006).
45. Kesik H. İ., Korkut S., Hızıroğlu S., Sevik H., “An evaluation of properties of four heat treated wood species”, *Industrial Crops and Products*, 60: 60-65, (2014).
46. Karagöz U., Akyıldız M. H., İşleyen O., “Effect of Heat Treatment on Surface Roughness of Thermal Wood Machined by CNC”, *ProLigno*, 7(4): 50-58, (2011).
47. Ulay G., Budakçı M., “Ahşap Yüzeylerde Kullanılan Su Bazlı Vernikler İle İlgili Türkiye’de Yapılan Çalışmalar”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3: 470-480, (2015).
48. Özdemir T., Hızıroğlu S., Kocapınar M., “Adhesion Strength of Cellulosic Varnish Coated Wood Species as Function of Their Surface Roughness”, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015: 1-5, Article ID 525496, (2015).
49. Atar M., Cınar H., Dongel N., Yalınkılıc A.C., “The effect of heat treatment on the pull-off strength of optionally varnished surfaces of five wood materials”, *BioResources*, 10(4): 7151-7164, (2015).
50. Tutgun R., “Ağaç malzemedeki yüzey pürüzlülüğünün vernik katmanını tutunma direncine etkisi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2013).
51. Budakçı M., Pelit H., “Yağ Bazlı Tahta Koruyucunun Polyester Verniğin Yapışma Direncine Etkisi”, *Selçuk-Teknik Dergisi, Özel sayı 1*: 886-895, (2015).
52. Budakçı M., “Ahşap verniklerde katman kalınlığının sertlik, parlaklık ve yüzeye yapışma mukavemetine etkileri”, *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (1997).
53. Aydın İ., Çolakoğlu G., Akbulut T., “Ağaç malzemenin yapıştırılmasında adhezyon teorisi”, *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi Seri B*, 51(2): 91-99, (2001).

Examination of Flow Effects in Francis Turbine Models with Different Numbers of Rotor Blades

Selçuk KEÇEL¹, H. Güçlü YAVUZCAN¹, Adnan SÖZEN^{2*}

¹Gazi University, Faculty of Architecture, Department of Industrial Product Design

²Gazi University, Faculty of Technology, Department of Energy Systems Engineering

(Geliş/Received : 10.08.2016 ; Kabul/Accepted : 03.10.2016)

ABSTRACT

This study reviews velocity-pressure changes in spiral case, rotor and outlet pipes, force-torque values affecting the turbine rotor, vortexes in the outlet pipe, and pressure changes and vibration effects on two models with different numbers of rotor blades. The study evaluates the effect of different numbers of rotor blades on the flow and the effects on turbine components to obtain maximum turbine power. Furthermore, this study evaluates the relationship between the number of rotor blades and guide rotor blades on velocity-pressure interactions. The analysis determined the turbine rotor blade number to be 17 (Model 1) and 20 (Model 2) and the wicket gate angle was altered between 12°-48° to analyze the effects on turbine characteristics (velocity, pressure, torque, vortex, and power).

Keywords: Design of Francis Turbine, Computational Fluid Dynamics, Turbomachinery.

Farklı Rotor Kanat Sayısına Sahip Francis Türbin Modellerinde Akış Etkilerinin İncelenmesi

ÖZ

Bu çalışmada farklı rotor kanat sayılarına sahip iki model üzerinde, salyangoz, rotor ve çıkış borularındaki hız-basınç değişimleri, türbin rotoruna etkileyen kuvvet-tork değerleri, çıkış borusunda oluşan vorteksler ile basınç değişimleri ve titreşim etkileri incelenmiştir. Çalışmada maksimum türbin gücü elde edebilmek için farklı sayıya sahip rotor kanatlarının akışa olan etkisi değerlendirilmiş ve türbin bileşenlerinde meydana gelen etkiler incelenmiştir. Ayrıca rotor kanat sayıları ile yönlendirme kanat açıları arasındaki ilişki hız-basınç etkileşimleri üzerinde incelenmiştir. Yapılan analizlerde türbin rotor kanat sayısı 17 (Model-1) ve 20 (Model-2) olarak belirlenmiş ve yönlendirme kanat açısı 12o-48o aralığında değiştirilerek türbin karakteristikleri (hız, basınç, tork, verim ve güç gibi) üzerinde oluşan etkiler incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Francis türbini tasarımı, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Turbomakinalar.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Computational Fluid Dynamics (CFD) analyses have powerful design tools to display flow characteristics of hydraulic power components. Many researchers have benefited from CFD applications while analyzing rotor-stator interactions, cavitation behaviors, and performance under various loads in the computational analysis of Francis turbines.

Čarija et al. (2010) made an analysis with CFD for different discharge flows in the outlet pipe of a Francis turbine system. Fifteen rotor blades were used in the model with 20 wicket gates; vortexes in the outlet pipe were reviewed and small changes were observed in efficiency levels [1]. Ruofu et al.(2008) studied pressure distribution on the turbine rotor under seven different boundary conditions (68%-75%-85%-92%-100%-106%-113%) for partial, normal, and extreme loads with a fixed head value[2]. Choi et al. (2013) made an optimization through CFD on a 500kW horizontal axis Francis turbine

measurements and obtained improvements in efficiency up to 9.96% [3]. In the study performed by Saaed et al. (2010), different models constructed to reduce the stresses on the vanes of the turbine were investigated. In these models, components of the radial and tangential velocity as well as the strength of the vanes at different loading and flow rate values were examined. In the parametric model constructed by, the flow analysis of the exit tubes and their structural analysis were performed. In the structural analysis, total deformation and forces creating stress were visualized [4]. In another study performed by Okyay et al. (2009), Francis turbine design related with computational fluid dynamics was performed and variation in the pressure of grid structure which raised around the stay vanes and spiral was demonstrated [5]. In two study performed by Chen (2009), the stresses on wicket gate and rotating runner of a Francis turbine formed by a flow were examined by finite elements method [6]. Jain, et al. (2010) reviewed the rates of input-output powers at different flow rates in a study for efficiency estimation with the help of CFD in a horizontal axis Francis turbine. They obtained output values on two different boundary conditions (pressure

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: asozen@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2017.20.1 241-249

input and mass flow input) and provided recommendations to the manufacturers [7]. Pennacchi et al. (2011) developed a model to reduce vibration on turbine blades. They attempted to reduce vibration on blades with a compression mechanism on connection points of blades [8]. Zhange et al. (2012) studied cavitation behaviors of a high head Francis turbine under partial load. They developed an empirical relationship for cavitation amounts in areas close to the turbine wheel and the output pipe [9]. Bing et al. (2012) studied vibrations on the main shaft system with ANSYS software for critical rotational speeds and made certain dynamic analyses to be used as a reference in turbine design [10]. Nilsson et al. (2000) calculated velocity and pressure effectiveness at certain distances by changing angles of the output axis for Kaplan and Francis water turbine wheels [11].

This study obtained geometric values for the turbine with calculations for six different models in the literature according to data for a point with a known flow rate and head values. The turbine was designed with one of the various calculation techniques, the Kuarner method [12]. The number of wicket gates were obtained and the wheel was designed with geometric values of the turbine. The designed turbine scroll, fixed blades, wheel and outlet pipes were prepared and analyzed with the modules in CFD software.

2. FLOW SIMULATIONS (AKIŞ SİMÜLASYONLARI)

2.1. Geometric model (Geometrik Model)

To the start turbine design, a flow rate of $56.15\text{m}^3/\text{h}$ and a head value of 100m were set as the physical parameters, the number of revolutions was 250min^{-1} according to different calculation results based on these values. Moreover, while selecting the number of revolutions, the Kuarner method, which provided the closest value to 250min^{-1} , was selected after calculations with the methods in Table 1.

The Kuarner method was preferred considering its compliance with design criteria in terms of specific speed, flow rate, power parameters, and the statement : "The output of Francis turbines with a specific speed of 150min^{-1} to 250min^{-1} is known to be better than others [12]" in literature. Additionally, the most important point to consider while selecting the specific speed and the number of revolutions is to select " n_s " upper limit and " n " lower limit to obtain maximum power from a certain head value. It should also be noted that with more turbine revolutions, the size of turbines and plants will decline, and hydromechanical and electromechanical parts will cost less; on the other hand, the plant will be immersed deeper to resist cavitation and construction costs will increase [12,13].

Table 1. Methods for calculation of the specific rotation speed (Özgül devir sayısı hesaplama metotları)

Method	$n_s(\text{min}^{-1})$	$n_s(\text{min}^{-1})$	$n(\text{min}^{-1})$	$n(\text{min}^{-1})$
Osterien	$n_s = 3500/H_d^{0.7}$	$n_s = 142.3$	$n = n_s(H_d^{1.25})/(P^{0.5})$	$n = 172.8$
Voith	$n_s = 4140/H_d^{0.7}$	$n_s = 168.3$	$n = n_s(H_d^{1.25})/(P^{0.5})$	$n = 204.4$
Kuarner	$n_s = 5000/H_d^{0.7}$	$n_s = 203.3$	$n = n_s(H_d^{1.25})/(P^{0.5})$	$n = 246.9$
Egzozarof	$n_s = 5000/H_d^{0.75}$	$n_s = 161.7$	$n = n_s(H_d^{1.25})/(P^{0.5})$	$n = 196.4$
USA	$n_s = 2334/H_d^{0.5}$	$n_s = 236.9$	$n = n_s(H_d^{1.25})/(P^{0.5})$	$n = 287.7$
Leva	$n_s = 3470/H_d^{0.65}$	$n_s = 177.3$	$n = n_s(H_d^{1.25})/(P^{0.5})$	$n = 215.4$

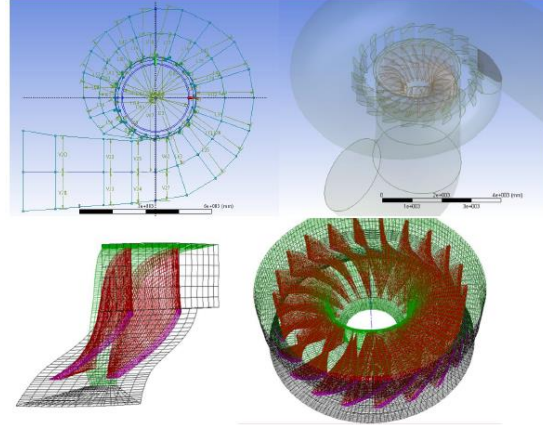


Fig. 1. Model geometries (Model geometrileri)

As a result of the calculation, 20 wicket gates were used in the turbine spiral case (Figure 2). The fixed number of wicket gates in the Figure is 20 and the modification to the wicket gate angles was made changing the " β_{ij} " angle from the "q" point. The rotor blade number was set to 17 (Model 1) and (Model 2) to analyze the principle of different denominators for the fixed blade number and the rotor blade number after drawing rotor blade profiles (Figure 3).

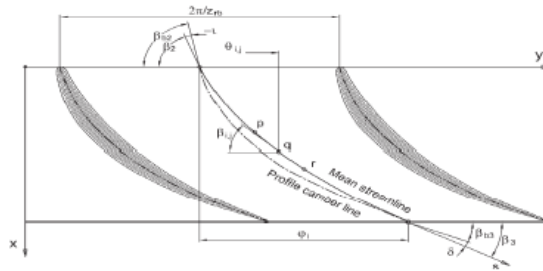


Fig. 2. Wicket gate profile (Yönlendirme kanat profili)

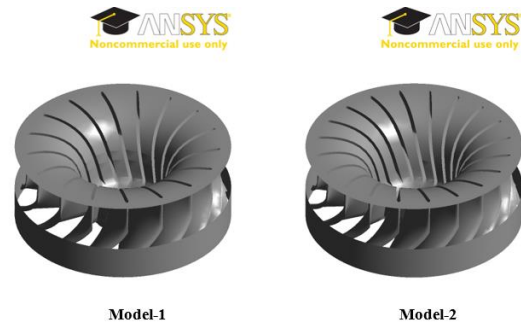


Fig. 3. Rotor views of Model and Model 2 (Model-1 ve Model-2'ye ait rotor görünüşleri)

2.2. Meshing Process (Düğümlenme İşlemleri)

The Meshing module, which is important to achieve the most accurate conclusion in the computational analysis of the geometric model, was established in 3D. Tetragonal, Wedge, and Pyrisma mesh structures were used in the 3D meshes in the meshing module. Considering quality of the meshes that are important for convergence in the computational solution, quality is known to increase with a skewness value closer to 0 and decrease with a skewness value closer to 1 [14,15,16]. Considering the skewness values of the meshes of two models in this study, close to 90% have a mesh quality below 0.5. These meshes have 750.456 nodes and 3.846.257 elements. The table graphic of mesh quality is provided in Figure 4.

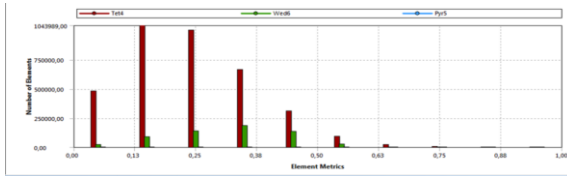


Fig. 4. Mesh quality (Düğümlenme kalitesi)

In the mesh module, the curvative method was used, high mesh quality was obtained, and mesh quality was increased by setting the span angle center between 12-36°. On the other hand, a five-layer inflation was configured to better see the boundary layer and flow regimes to occur in areas close to the boundary. The growth rate between these layers was kept as 1.2. Analyses are made in rotating systems by using the coordinate system. These systems are used by stating the boundaries on the reference axis in angular velocity or revolution number according to their respective axis. While analyzing the equations of motion depending on the rotating axis, it is required to enter the relative velocity or angular velocity for the rotating reference axis boundary. In this study, an angular velocity 26.16s^{-1} was entered for a -1 counterclockwise rotation on the y axis.

2.3. Numerical modelling of turbulent fluid flow (Türbülanslı Akışta Sayısal Model)

For a stable and three-dimensional flow, the conservation of mass is described by the following continuity equation:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Here, u, v, w represent the velocity values in x, y, z directions, respectively. For a stable and three-dimensional turbulent flow, equations of momentum are as follows;

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \frac{\partial(-p + \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + S_{My} \quad (3)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + S_{Mz} \quad (4)$$

In these equations, the surface stresses and body forces are described separately such that the contributions from body forces are designated as source terms, i. e., S_{Mx} , S_{My} , S_{Mz} . Note that, in a model, the body force originating from gravity is represented by source terms having values of $S_{Mx} = 0$, $S_{My} = -\rho g$, $S_{Mz} = 0$ [14,15]. When an incompressible fluid flows through a Francis turbine, the analysis of the flow for the entire system is performed by using the following forms of the continuity equation and Reynolds-averaged Navier – Stokes equation [14];

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad}u) + S_{Mx} \quad (5)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad}v) + S_{My} \quad (6)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad}w) + S_{Mz} \quad (7)$$

It is possible to write the Navier – Stokes equation in a more suitable form such that it can be used in the development of the finite volume method. Reynolds number is frequently used in the modeling of the turbulent flow and thereby the effects of turbulent flow are frequently given by Reynolds stresses, s_{ij} , which are calculated from the k - ϵ turbulence model. It should be noted that in order to convert the Reynolds-averaged Navier – Stokes equations to algebraic equations, unstructured finite volume approach is used in the code of the model and these algebraic equations are solved numerically [14,15].

2.3.1. Transport equations for the k- ϵ model (k- ϵ transport denklemi)

The transport equations given below are used to derive the turbulent kinetic energy and its rate of dissipation:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + c_{3\epsilon} G_b) - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (9)$$

2.3.2. Transport Equations for the RNG k- ϵ Model (k- ϵ RNG transport denklemi)

The RNG model has a similar form to the standard k - ϵ model

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha_k \mu_{eff} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\alpha_\epsilon \mu_{eff} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + c_{3\epsilon} G_b) - c_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} - R_\epsilon + S_\epsilon \quad (11)$$

Here, the turbulent kinetic energy as a result of the mean velocity gradient is given by G_k . Similarly, G_b describes the turbulent kinetic energy due to buoyancy. It should be noted that the mean velocity gradient and buoyancy

are calculated as depicted in the modelling turbulent production and effects of buoyancy on turbulence in the $k-\epsilon$ models, respectively. Y_M represents the contribution of the fluctuating dilatation incompressible turbulence to overall dissipation rate, calculated as described in effects of compressibility turbulence to the overall dissipation rate, calculated as described effects of compressibility on turbulence in the $k-\epsilon$ models. The quantities α_k and α_ϵ are inverse effective Prandtl number for k and ϵ , respectively. S_k and S_ϵ are user-defined source terms [14].

2.4. Boundary conditions (Sınır Şartları)

The system was modeled in three main parts according to the calculated values. Using the pressure-based analysis system, water at 23°C was used in the system, defined as the spiral case, rotating wheel, and outlet pipe. Creating a flow and control volume for the rotating wheel, the y rotating axis was defined by entering an angular velocity value of 250 min⁻¹. Moreover, the k-ε model and “swirl dominated flow” were used in turbulent analyses for rotating systems and flows with a high Reynolds number. 13 bars of pressure for x=1 direction in cartesian coordinates was used as inlet pressure as an inlet boundary condition. Inlet length of run as well as turbulent viscosity values were defined as 10 %.

In the model, which was defined as “pressure outlet” at the outlet boundary condition, pressure and velocity values originating from adjacent surfaces were used.

2.5. Resolution Phase

When the dot products of pressure and viscous forces with a specific force vector, a , are summed up the total force component along that force vector is obtained. By this way, pressure and viscous force components of the total force in the direction of the vector a can be expressed separately:

$$F_a = \vec{a} \cdot \vec{F}_p + \vec{a} \cdot \vec{F}_v \tag{12}$$

where a is specified force vector, F_p is pressure force vector, F_v is viscous force vector. Apart from pressure and viscosity based forces and total force, the corresponding force coefficients can be calculated for selected Wall zones by taking the reference values into consideration. Then, these force coefficients are divided by $\rho v^2/2$.

3. RESULTS AND DISCUSSION (BULGULAR VE TARTIŞMA)

Convergence curves were obtained from analyses of two models. Using the analyses, pressure, velocity, friction effects, moment, flow lines, and gradients, which are difficult to observe under normal conditions, were observed. Pressure and velocity values for points on the spiral case, fixed channel inlets and outlets and the outlet pipe in different models were reviewed.

3.1. Torque and Power Changes (Tork ve Güç Değişimleri)

Torque, output, and power factors were evaluated by changing wicket gate angles, which were positioned at

equal distances in the spiral case and allowed for conversion of the tangential velocity of the fluid to work in the most efficient way. Force and torque values can be directly measured from the fluent and CFD-Post module or can be obtained from the Euler moment equation. Force and torque values calculated separately for every model by the software are listed in Table 2. Values obtained by multiplying the torque values obtained after the analysis of the models in the software by angular velocities were provided as the turbine power.

Table 2. Torque and power for wicket gate angles (Yönlendirme kanat açısına göre Tork ve Güç değerleri)

Angle	Model 1		Model 2	
	Torque (x10 ⁶ Nm)	Turbine power (MW)	Torque (x10 ⁶ Nm)	Turbine power (MW)
12°	1.747	45.706	1.554	40.656
15°	1.834	47.986	1.725	45.128
18°	1.962	51.337	1.866	48.482
21°	2.032	53.175	1.933	50.589
23°	2.054	53.736	1.946	50.931
24°	2.068	54.122	1.968	51.500
25°	2.029	53.081	1.975	51.682
27°	2.032	53.162	1.951	51.059
30°	2.010	52.605	1.930	50.508
33°	1.960	51.274	1.879	49.165
36°	1.939	50.729	1.790	46.829
39°	1.863	48.762	1.748	45.749
42°	1.807	47.287	1.677	43.896
45°	1.705	44.624	1.608	42.068
48°	1.554	40.675	1.518	39.711

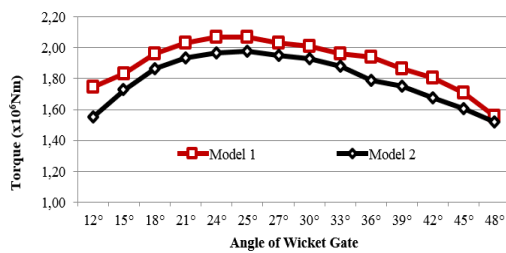
A maximum turbine power of 55.03 MW was obtained for the flow rate and selected head parameters in turbine measurement. Considering the theoretical power values for Model 1, turbine output in the best wicket gate angles was 98.3%. In Model 2, the turbine had 93.5% output after a change of 24 degrees in the angle.

Table 3 demonstrates that Model 1 was more efficient than Model 2. Significant differences were obtained between torque values caused by wicket gate angles between 12° and 48° on the rotor in the model of the turbine data calculated accordingly. Separately evaluating the models, output and power loss occurred between 30-33% in different wicket gates. The extent of the difference is presented in Table 3.

Table 3. Turbine output loss by models (Modellere göre türbin verim kayıpları)

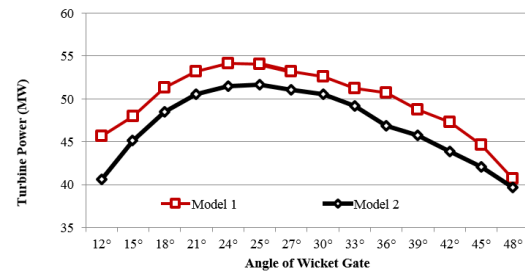
Angle	Model 1 (24°-48°)		Model 2 (24°-48°)	
	Torque (10 ⁶ Nm)	Turbine power (MW)	Torque (10 ⁶ Nm)	Turbine power (MW)
Highest output (24°)	2.068	54.122	1.975	51.682
Lowest output (48°)	1.554	40.675	1.518	39.711
Output loss	33.05%		30.14%	

The highest torque value was obtained at 24° in Model 1 and Model 2, based on the available data. An average output difference of 5.86% was obtained between the torque and power values of Model 1 and Model 2. As described in the purpose of the study, it clearly demonstrated the output difference arising from the principle of applying a different denominator for the wicket gate number and the rotor blade number in literature.

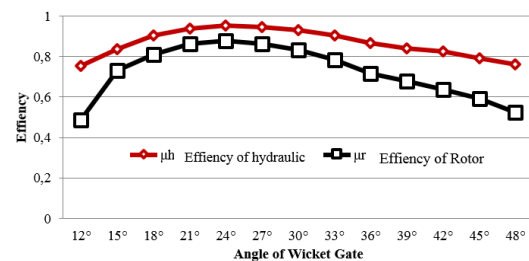
**Fig. 4.** Torque values of the models by the wicket gate angle (Yönlendirme kanat açısına göre modellerin tork değerleri)

A graphic is provided in Figure 4 for torque values obtained from the turbine rotor. A difference of 2×10^5 Nm was observed as the average torque value between the models. The ratio between torque values and power values obtained from the fluent model equals to the radius of the turbine rotor.

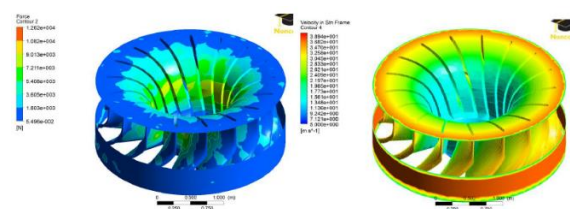
It is clear that torque values obtained from the turbine rotor were higher between 18°-33°. The main reason is that the tangential velocity of the fluid discharged from the turbine wicket gates changes and the ratio of rotor input velocity (u) to rotor output velocity (v_1) differed by 0.5. The change in the power value that can be obtained from the turbine shaft for the number of revolutions known to be 26.16rad/s (250 min⁻¹) of the turbine with the torque values depending on the wicket gate angle is provided in Figure 5. The change between torque and turbine power was parallel. Maximum turbine power was obtained at a 24° blade angle for Model 1 and Model 2.

**Fig. 5.** Turbine power values by the wicket gate angle (Yönlendirme kanat açısına göre Türbin gücü değerleri)

For Model 2, the change in hydraulic output and rotor output by the wicket gate angle is provided in Figure 6. Maximum hydraulic and rotor output obtained from the velocity at the rotor inlet was obtained at the 24° wicket gate angle.

**Fig. 6.** Change in hydraulic and rotor outputs in the model by the wicket gate angle (Model-2 hidrolik ve rotor verimlerinin yönlendirici kanat açısı ile değişimi)

Power changes in the turbine rotor are provided in Figure 7. As seen in Figure 7a, power required for rotation gradually decreased from the center of the turbine rotor towards the blade inlets. At this point, the necessary power for a rotation speed of 250min⁻¹ of the rotor varies by the turbine rotor radius.

**Fig. 7.** Power on turbine rotor surfaces 7-a, velocity values 7b, (7a Türbin rotor yüzeylerinde oluşan kuvvet, 7-b hız değerleri)

The general condition of velocity distribution in the turbine rotor is provided in Figure 7b. Uniform velocity distribution on the shaped rotor explains how pressure forces transferred to the rotor are absorbed. Velocity decreases by about ½, considering velocity distributions at the rotor inlet and the rotor outlet. This provides a value that is very close to maximum turbine outputs.

3.2. Velocity and Pressure Changes (Hız ve Basınç Değişimleri)

The selection of points on the turbine is generally based on geometric model sections and closeness to the center (Figure 8). Using the CFD-Post module, pressure and velocity values for all angle changes in Model 1 and Model 2 were obtained from the coordinates of the concerned points.

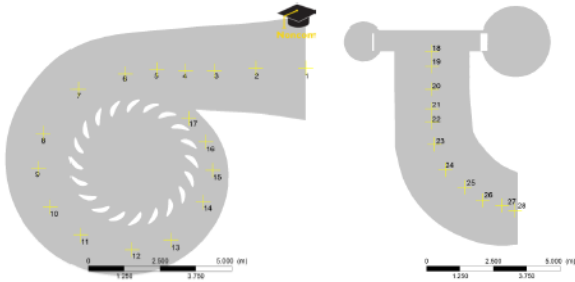


Fig. 8. Points selected on the spiral case (Salyangoz üzerinde seçilen noktaların gösterimi)

3.2.1 Velocity Changes (Hız Değişimleri)

This section evaluates velocity distributions on the system for the turbine rotor with 17 blades within point, plane, and flow volumes. Figure 9 displays values on the points determined for the three models with the highest output in the concerned velocity distribution.

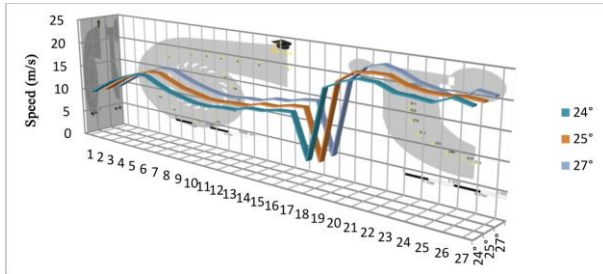


Fig. 9. Turbine point velocity graphic for Model 1 (Model-1 için türbin noktasal hız grafiği)

The role of the spiral case is to ensure that the supply water enters at equal velocities and equal pressures around the rotor blades. Velocity distributions along the spiral case in the turbine decreased starting from the entry point of the fluid into the rotor (from point 4 to point 17) and exhibited a velocity change of 3m/s. Velocity significantly decreased in the dead core zone where the fluid hits the turbine rotor and is directed to the outlet pipe. Acceleration gradually increased after this point, starting from the inlet of the outlet pipe. After the outlet pipe, velocity decreased due to vortex flows and was directed to the diffuser from the outlet pipe.

The results of the velocity analyses in Model 1 and Model 2 were examined. Changes are clearly displayed with comparisons between the same wicket gate numbers and velocity limits in the two models. The point values are

provided in graphics. Moreover, statements about similar changes in the two models are explained further and supported with images.

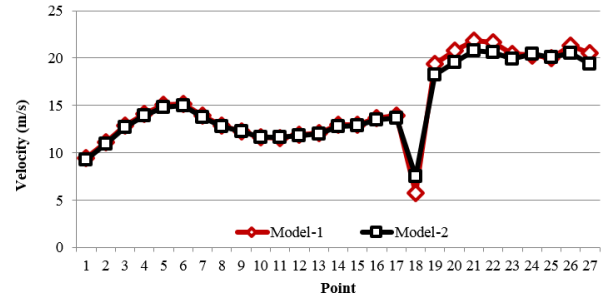


Fig. 10. Velocity changes in Model 1 and Model 2 (Model-1 ve Model-2 hız değişimleri)

Comparison between two models for the highest output level at 24° is provided in Figure 10. Velocity distributions in the spiral case section in the figure have similar values. In addition, there was a difference in velocity distribution for points 17 and 18 where inlet-outlet velocity values were provided as used in the torque-power calculation. The main parameter that caused Model 1 to be more efficient compared to Model 2 was mainly obtained from this change. In Model 1, the pressure of the fluid received by the rotor was absorbed and velocity in the dead core zone dropped by approximately 3 m/s compared to Model 2. The main reason for the 5% increase in turbine output in Model 1 can be concluded to arise from this change in velocity at the rotor outlet.

Figure 11 displays changing velocity flows throughout the turbine system. Velocity distribution at the outlet pipe and flow lines show differences in terms of value and number between two models. The vortex flows, described for their effects and significance, can be clearly seen to condense along the outlet pipe in Model 2. It can be concluded that the viscous forces of these vortices increase, and thus, changes in velocity at rotor inlets-outlets directly decrease the torque value. The decrease in torque values was 5% as shown in Table 5.3.

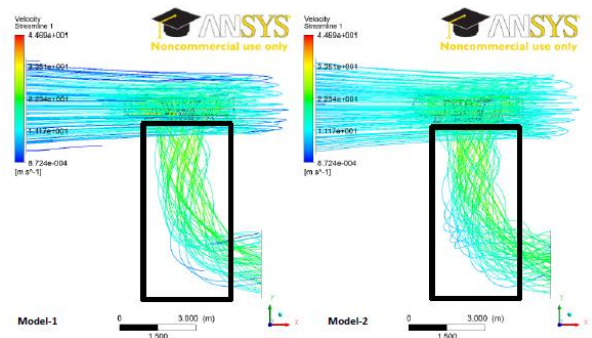


Fig. 11. Model 1 and Model 2 velocity flow lines (24° angle) (Model-1 ve Model-2 hız akım çizgileri)

In conclusion, velocity fluctuations throughout turbine systems, depending on changes in blade numbers and guide angles preferred in turbines, directly affect turbine output. Another important point other than torque and output is vibrations in the turbine shaft due to fluctuations in the outlet pipe. Every vortex to be formed for additional blades causes more yaw and vibration in the turbine shaft and directly affects turbine life. Vortex flows occur depending on the turbine specific velocity in the dead water core, as shown in Figure 12. They support the formation of turbulent flow areas that cannot be calculated by the intensity of vortex flows. The directions of the dead water core and vortex flows at a 24° angle, depending on changing velocities in the outlet pipe section, are provided in Figure 12.

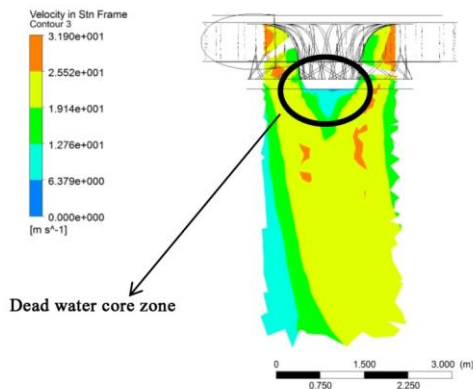


Fig. 12. Water core zone in the outlet pipe section (24° angle) (Çıkış borusu kesitinde oluşan ölü su çekirdek bölgesi (24°'lik açı için))

In this figure, water velocity in the dead water core zone is very low. There are flows at the edges of the core zone due to rotor rotation. Velocity distribution in the outlet pipe is clearly seen in the rectangle section view. Vortex developments in the outlet pipe in Model 1 are provided in Figure 13. Although the flow lines emerging after the dead core zone between 12°-18° have very low velocity values, the number of rotating flows is high. The vortex effects, which begin to occur at the start of the outlet pipe after a change of 36°, are lower between 36°-48° compared to Model 2.

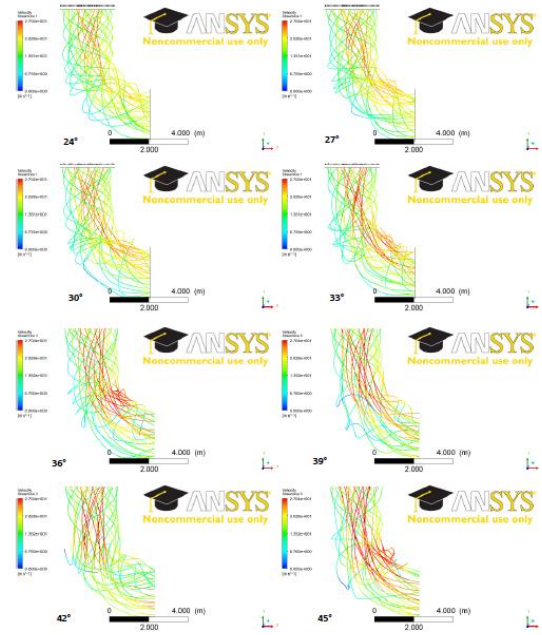
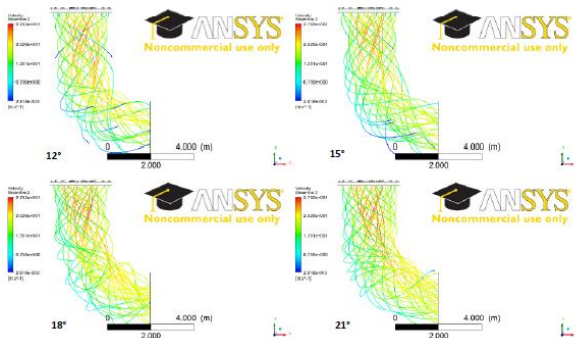


Fig. 13. Development of flow lines in 12-45° outlet pipe (12-45° çıkış borusunda oluşan akım çizgilerinin gelişimi)

3.2.2. Pressure changes (Basınç Değişimleri)

According to the results of the analysis in the models, pressure change in the highest output in the spiral case section had homogenous development. It is clearly observed that high pressure water is absorbed in the area of the turbine rotor and energy is transferred to the turbine rotor. Turbine power absorption seems problem free at this point.

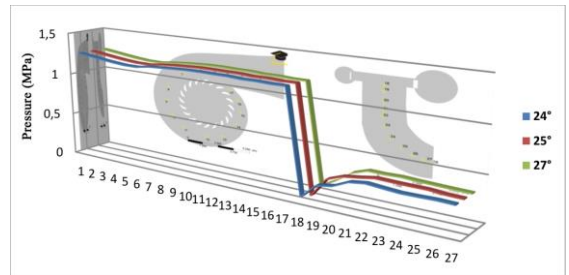


Fig. 14. Pressure change in the turbine spiral case and outlet pipe (Türbin salyangozu ve çıkış borusundaki basınç değişimi)

Figure 14 provides a pressure change graphic for Model 1 at 24°-25°-27°, with high efficiency wicket gates. Thirteen bar pressure, defined to be the requirement for input along the spiral case section in the graphic for changing pressure throughout the turbine, remained almost fixed homogeneously along the entire spiral case. High pressure water entering from the turbine spiral case was absorbed by the turbine rotor and was transferred to the turbine shaft between points 17 and 18. A pressure change of approximately 11 bars occurred in the turbine. Low pressure water was discharged from the outlet pipe

with the effect of gravity and density (Figure 14). Pressure distribution in the outlet pipe is provided in Figures 15 and 16. Pressure distribution according to the spiral case section seems to increase in areas closer to the outlet pipe.

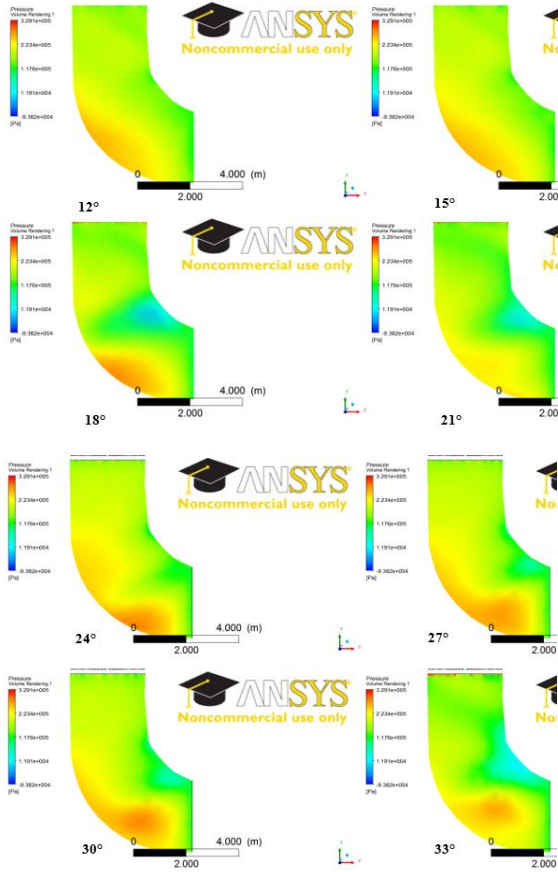


Fig. 15. Pressure distribution in the outlet pipe between 12°-33° (12°-33° aralığında çıkış borusunda ortaya çıkan basınç dağılımı)

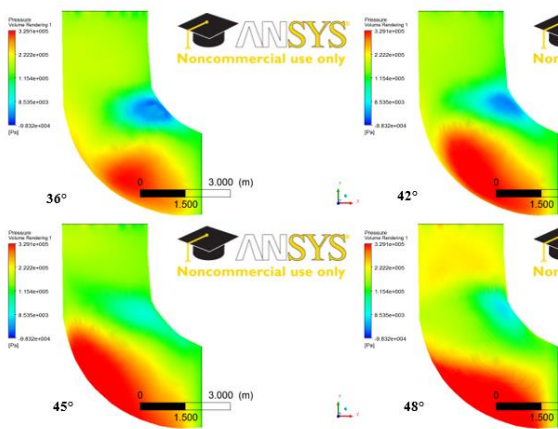


Fig. 16. Pressure distribution in the outlet pipe between 36°-48° (36°-48° aralığında çıkış borusunda ortaya çıkan basınç dağılımı)

Pressure distribution in the outlet pipe depending on varying angles is clearly provided in Figures 15 and 16. Certain areas were not homogenous and pressure increases emerged, particularly in areas closer to the end of the outlet pipe in the angle variance range of 36°-48°. While pressure reached 4 bars on the bottom of the outlet pipe at 36°-48°, it exhibited a vacuum effect in the upper area. This caused the system to create a turbulent flow, and generate pressure fluctuations, knocking, and noise and thus, vibration in the turbine shaft.

4. CONCLUSION (SONUÇLAR)

It is difficult to design and calculate many components due to complex structures, considering operating conditions of turbines. The two phase analysis method used in the study reviewed changes in torque, output, and resistance of turbine efficiencies with blade angles. The output difference by angles in turbine efficiencies varied between 5-14%.

Computational fluid dynamics software proved useful in determining flow lines around the turbine spiral case and blades and observing the effect of tangential velocity components on the turbine rotor. Furthermore, changes in blade angles and changes in force and torque values in the turbine rotor were clearly observed. For the efficient range of 24°-27° for Model 1 and Model 2, obtaining same results in different studies in the field [7] is very important for accuracy of this study.

Pressure distribution was homogenous for boundary conditions, which were determined at the inlet along the spiral case, and provided operating pressure in the models. The two-phased model comparisons in the turbine rotor described the effects of reduced number of blades and different number of wicket gates. The outlet pipe analyses in Model 1 and Model 2 examined flow fluctuations and vortex formations. The number and intensity of the vortices as well as vibrations they would cause in Model 1 were low.

Output differences between the two models demonstrated the effect of pressure absorption and velocity changes in the turbine rotor. The fact that results from the models generated similar values indicated the accuracy of the analysis results. Benefiting from CFD and FEM software before production in turbine design can be said to offer important advantages in terms of time, cost, and reliability.

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. Čarija Z, Z. Mrša, Complete Francis turbine flow simulation for the whole range of discharges. *In: 4th International Congress of Croatian Society of Mechanics*, Bizovac, Croatia, 105-110,(2003).
2. Ruofu X, Zhengwei W., Yongyao L., "Dynamic Stresses in A Francis Turbine Runner Based On Fluid-Structure Interaction Analysis", *Tsinghua Sci Technology*,13(5): 587-592, (2008).
3. Choi H. J., Mohammed A.Z., Hyoung-Woon R., Pil-Su H., Sueg-Young O., Young-Ho L., "CFD Validation of

- Performance Improvement of a 500 kW Francis Turbine”, *Renewable Energy*, 54: 111-123, (2003).
4. Saaed, R.A., Galybin A.N., Popov V., “Modelling of flow-induced stresses in a Francis turbine runner”, *Advances in Engineering Software*, 41: 1245–1255,(2010).
 5. Okyay, G., Çelebioğlu K., Aydın İ., Ger A.M., “Design of a Francis Type Water Turbine Using Computational Fluid Dynamics Methods”, *Nuclear & Renewable Energy Resources Conference With International Participation*, Ankara-Turkey, 388-394, (2009).
 6. Chen, W.C., K. Celebioglu, “Structural Analysis of Francis Type Turbine using Finite Element Method”, *In: Nuclear & Renewable Energy Resources Conf. with Int. Particip.*, Ankara-Turkey, 378-383, (2009).
 7. Jain S., Saini R. P., Kumar A., “CFD Approach for Prediction of Efficiency of Francis Turbine”, *IGHM, AHEC*, IIT, Roorkee, India, (2010).
 8. Pennacchi P., Chatterton S., Bachschmid N., Pesatori E., Turozzi G., “A Model to Study the Reduction of Turbine Blade Vibration Using The Snubbing Mechanism”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25: 1260–1275, (2011).
 9. Zhanga H., L. Zhang, “Numerical Simulation of Cavitating Turbulent Flow in a High Head Francis Turbine at Part Load Operation with Openfoam”, *International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation*, Procedia Engineering 31: 156–165, (2012).
 10. Bing B. B., Zhang L., Guo T., Liu C. Analysis of Dynamic Characteristics of the Main Shaft System in a Hydro-turbine Based on ANSYS, *Procedia Engineering*, 31:654 – 658, (2012).
 11. Nilsson H., Davidson L. A., “Numerical Comparison of Four Operating Conditions in a Kaplan Water Turbine”, *Focusing on Tip Clearance Flow Published in the proceedings of the 20th IAHR Symposium*, Charlotte, North Carolina, U.S.A. <http://www.hcipun.com/iahr2000>
 12. Başşeme H., *Hydroelectric Power Plants*, General Directorate of EUAS, Ankara, 15-95, (2003).
 13. Cengel Y., Cimbala J.M., *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*, Ed. 3, McGraw-Hill, New York, USA,(2014).
 14. ANSYS Inc., *Fluent Theory Guide*, Southpointe Technology Drive Canonsburg, USA,(2011).
 15. Versteeg H.K., Malalasekera W., *An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method*, Pearson Prentice Hall Second edition, 1-16.,(2007).
 16. Sözen A., Keçel, S., Yavuzcan H.G., “The Effect of the Angle of The Wicket Gate on Turbine Efficiency And Strength in Francis Type Turbines”, *Journal of Gazi University Engineering and Architecture Faculty*, 29(2):243-252, (2014).