

İÇİNDEKİLER / CONTENTS

	Sayfa No
Ahmet KARADEMİR, Mehmet Kubilya EKER Transformatör T-Bağlantı Yapısının Çekirdek Kayıplarına Etkisi Effect of The Different T-Joint Design at Power Transformer.....	389-397
Mustafa Yavuz CELİK, Gaye TAN Döğer (İhsaniye-Afyon) Tüflerinin Doğal Yapı Taşı Olarak Teknolojik Özellikleri ve Mevlî Cami Restorasyonu Technological Features of the Döğer (İhsaniye-Afyon) Tufls as Natural Building Stones and Mevlî (Turbe) Mosque Restoration.....	399-408
Selâm GÜRGEN, Melih Cemal KUSHAN Kayma Alında Katışım Sıvıların Reolojik Özellikleri Rheological Properties of Shear Thickening Fluids.....	409-414
Nihat PAMUK Empirical Analysis of Causal Relationship between Electricity Production and Consumption Demand in Turkey Using Cobb-Douglas Model.....	415-420
Tunc APATAY Exact Solution to Elastic Behavior of Periodic Heat Generating Solid Cylinder.....	421-426
Battal DOĞAN Ev Tipi Olarak İncelenmiş Bir CNG Kompresör Prototipinin Performans ve Çalışma Parametrelerinin İncelenmesi Analysing the Performance and Working Parameters of A CNG Compressor Prototype Designed As A Household Type.....	427-431
Emel KURAM AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin Erzelelenmesinde Farklı Kaplama Malzemelerinin Takım Aşınmasına, Kesme Kuvvetlerine ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri Algoritmaları ile İrdelenmesi.....	433-443
Uğur GÖKMEY Sıcak Ekstrüzye Edilmiş Al 2024 Matrisli B4C/Al2O3 Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu Fabrication and Characterization of Hot Extruded Hybrid Composites Al 2024 Matrix Reinforced With B4C/Al2O3.....	445-453
Cinçet BAYILMIŞ, Zühâl YILDIRIM CANWEB: Denetleyici Alan Ağları için Web Temelli Eğitimsel Arayüz CANWEB: A Web-Based Educational Interface for Controller Area Networks.....	455-460
Mustafa YILMAZ, Recep KANTI, Mürsel ERDAL, Serkan YILDIZ, Adem BAKIS Bin Bakım Onarım Ödemelerinin Etkin Kullanımı Maksadıyla Hale Belirli Etkileyen Faktörlerin Yapı Sınır Ağları ve Lineer Regresyon Yöntemleri ile Belirlenmesi Determination of The Factors Effecting The Tender Price by way of Artificial Neural Networks and Linear Regression Analyses in order to Utilize Maintenance and Repair Funds More Effectively.....	461-470
Ersin NAMLI, Halil İbrahim ERDAL, Hamit ERDAL Dalgaçık Dönüşümü ile Beton Basınç Dayanım Tahmininin İyileştirilmesi Improving Prediction Accuracy of Concrete Compressive Strength via Wavelet Transform.....	471-480
Cem EMERKİSİZ, Zafer DOĞAN, Levent GÖKREM, A.Hakan YAVUZ Tokat Bölgesi Rüzgar Karakteristiklerinin İstatistiksel Yöntemler ile İncelenmesi Analyzing The Wind Characteristics of Tokat Region With Statistical Methods.....	481-489
Ahmet Murat PİNAR, İbrahim AYDIN, Korcan FIRAT AISI 4140 Çeliğin Çok Yönlü Takımla Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülük Performansının Optimizasyonu Optimization of Surface Roughness Performance in The Turning of AISI 4140 Steel With Multi Directional Cutting Tool.....	491-498
Serdar KÜÇÜK Trigonometrik Splin Kullanarak Robotlar İçin Optimal Yörünge Elde Edilmesi Optimal Trajectory Derivation for Robotic Manipulators by Using Trigonometric Splines.....	499-505
Mehmet AVCAR Pasternak Zemine Oturan Eksenel Yüke Maruz Homojen Olmayan Kirişin Serbest Titreşimi Free Vibration of Non-Homogeneous Beam Subjected to Axial Force Resting on Pasternak Foundation.....	507-512
Cevdet SÖĞÜTLÜ Ceviz ve Armut Odunlarında Yapışma Direncinin Belirlenmesi Determination of the Bonding Strength on the Walnut and Pear Wood.....	513-518
Handan AKYAR Bir Üretim Sistemi İçin Üçgenin İç Teğet Çemberinin Merkezi Yardımıyla Bulunak Risk Analizi Fuzzy Risk Analysis Based on the Incenter of a Triangle for a Production System.....	519-530
Özlem ÖZCELİK, Kurtuluş BORAN Kömür Yakıtlı Termik Santrallere Alternatif Petek Yakıtlı Termik Santraller Coal-Fired Power Plants Alternative Petcoke Fired Power Plants.....	531-535
Hüseyin KİS, Duran ALTIPARMAK, Gürkan BAŞAR Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilmiş Uçucu Kül Takviyeli Bronz Matrisli Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Özellikleri Üzerine Kolemanit Miktarının Etkisi The Effect of Colemanite Content on Friction-Wear Properties of the Bronze Based Brake Lining Material Reinforced with Fly Ash Fabricated by the Hot-Pressing Method.....	537-546
Adnan SÖZEN, Erdem ÇİFTÇİ İsti Tekerleği Performansının Hesaplamalı Akışkanlık Dinamiği ile Belirlenmesi Determination of Performance of the Heat Wheel via CFD.....	547-554
Jacob Nağler On the electroosmotic and MHD Jeffery-Hamel flow of Nano fluid influenced by wall slip conditions.....	555-568
Engin GEDİK Experimental Investigation of Module Temperature Effect on Photovoltaic Panels Efficiency Modül Sıcaklığının Fotovoltaik Panellerin Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi.....	569-576
İlker YILMAZ, Ömer CAM, Murat TAŞTAN, Adem KARCI Farklı Rüzgar Türbin Kanat Profillerinin Aerodinamik Performansının Deneysel İncelenmesi Experimental Investigation of Aerodynamic Performance of Different Wind Turbine Airfoils.....	577-584
Tansel TUNÇAY A356 Alışımında Cu Miktarının Mikroyapı ve Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi Effect of Cu Content on Microstructure and Wear Behaviour in A356 Alloy.....	585-592
Eray ARSLAN Deformation and Electrical Behaviours of Functionally Graded Piezoelectric Curved Sensors.....	593-602
Kutay İCÖZ Ball Lens Based Mobile Microscope Küresel Lens Temelli Mobil Mikroskop.....	603-610
Mehmet Akif ERDEN, Muhammed Taha TAŞCI Toz Metallürjisi ile Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Ni İlavetinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi The Effect of Ni on the Microstructure and Mechanical Properties of Nb-V Microalloyed Steels Produced by Powder Metallurgy.....	611-616
Hüseyin Özan TEKİN, Tuğba MANİCİ, Vishwanath P. SINGHA An Investigation on Shielding Effect of Bismuth on Lung Ct Scan Using Monte Carlo Simulation.....	617-622
Hüseyin Kürşad SEZER Short Review on Laser Texturing and Cleaning Carbon Fibre Composites for Aerospace Applications.....	623-631
Ahmet Ali SERTKAYA, Talip AKBIYIK Short Operate With a Gasoline Internal Combustion Engine Evaluation of Different Boron Addition of The Fuel Additive Inside Performance and Emissions Impact.....	633-640

Journal of Polytechnic

POLİTEKNİK DERGİSİ

VOLUME / CİLT 19 NUMBER / SAYI 4 DECEMBER / ARALIK 2016

Politeknik Dergisi

Journal of Polytechnic

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

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

Editör / Editor
Prof. Dr. Adnan SÖZEN

YARDIMCI EDİTÖRLER/ASSOCIATE EDITORS

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

Cilt / volume : 19

Sayı / number : 4

Aralık / December : 2016

e - ISSN : 2147-9429

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

BU SAYIYA (CİLT 19 SAYI 4) KATKI VEREN HAKEMLER

Abdulcelil BUĞUTEKİN	İhsan KORKUT
Abdullah KURT	İhsan TOKTAŞ
Abdülmecit GÜLDAŞ	Kıvanç BAŞARAN
Adem ACIR (3 kez)	Kurtuluş BORAN
Adnan SÖZEN (2 kez)	M. Tolga ÖZKAN
Ahmet GÜRAL (2 kez)	Mehmet ÖZKAYMAK
Ahmet ÖZDEMİR	Mehmet TÜRKER
Asghar MESBAHI	Metin GÜRÜ
Ayhan ÖZÇİFTÇİ	Metin İPEK
Ayşe MURATHAN	Muammer NALBANT
Ayşegül GÜLTEKİN TOROSLU	Murat YÜCEL
Burak FELEKOĞLU	Mustafa AKTAŞ (2 kez)
Cemal KOÇAK	Mustafa ALTINOK
Diyar AKAY	Mustafa BURUNKAYA
Emel ABDİOĞLU	Mustafa İLBAŞ
Emin ÇİFTÇİ	Mürsel ERDAL
Engin ÖZDEMİR	Necmi ALTIN
Fatih ÇELİK	Nevin ÇANKAYA
Fatih Emre BORAN	Ömer CİVALEK
Figen BALO	Özge Andıç ÇAKIR
Gökhan GÖKMEN	Ramazan BAYINDIR (3 kez)
Gülben ÇALIŞ	Selçuk KIZIR
Hakan ATEŞ	Selim ACAR
Hakan DİLİPAK	Süleyman GÜNDÜZ
Halil ARIK	Şefik DURSUN
Haluk KORALAY	Tayfun MENLİK (2 kez)
Hülya DURMUŞ	Ulvi ŞEKER
Hüseyin USTA	Zafer BİNGÖL
İbrahim ATILGAN	Zakir TAŞ
İbrahim KARAAĞAÇ	

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

Transformatör T-Bağlantı Yapısının Çekirdek Kayıplarına Etkisi

Ahmet KARADEMİR¹, Mehmet Kubilay EKER²

Balıkesir Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

(Geliş / Received : 04.09.2015 ; Kabul / Accepted : 17.12.2015)

ÖZ

Modern imalat sürecinde, transformatör çekirdek saçları, 3 adet bacak, üst ve alt boyunduruk olmak üzere 5 adet kesilmiş parçadan istifleterek oluşturulmaktadır. Çekirdek kayıplarının en fazla olduğu orta bacak uzantısı olan T-bağlantı kısmı ise farklı kesim açılarında üretilmektedir. Bu çalışmada elektrik makineleri için gelişmiş bir elektromanyetik analiz programı olan Ansoft Maxwell kullanılarak, 7 farklı T-bağlantı formu için, toplam çekirdek kayıpları ve akı yoğunluğu dağılımları analiz edilmektedir. Ayrıca çalışmada, farklı T-bağlantı tasarımları için oluşan atıl malzemedeki değişimler incelenmektedir. Çalışma sonucunda, orta bacak boyunun mümkün olduğunca kısaltılmasının, hem kayıplar hem de atıl malzeme açısından iyileştirmeye neden olacağı belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Transformatör, T-bağlantı Açısı, Çekirdek Kaybı, Sonlu Elemanlar Yöntemi

Effect of The Different T-Joint Design at Power Transformer

ABSTRACT

In the modern manufacturing processes, sheets of the transformer core composed as stacked with 5 pieces of cut parts which have top and bottom yoke and 3 legs. Also it is seen literature resarch about a part of experimental and a part of computer analysis that is emphasized maximum core loss of no-load transformer at T-joint sections. Using electromagnetic analysis program Ansoft Maxwell which developed for electric machines, analysis are performed for 7 different T-joint design for this aim. Furthermore total core losses, flux density distributions and sections of the maximum loss of power on the core is analyzed. Also another aim of this study is to find proper design with regard to minimum discarded material for different T-joint designs at core production stage.

Keywords: Transformers, T-joint, Core Loss, Finite Element Method

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Enerji sistemlerinde, her türlü güç seviyesinde yoğun olarak kullanılmak zorunda olan transformatörlerin, imalat maliyetlerini düşük ve verimini yüksek seviyede tutmak için transformatör tasarımı ve optimizasyonu alanında yapılan çalışmalar güncelliğini korumaktadır [1-2]. Enerji sistemine bağlı olduğu sürece sistemden güç çeken ve yükün çektiği güç haricinde, transformatörün akım taşıyan kısmı (iletken) ve manyetik akı oluşan kısmının (demir çekirdek) çektiği güçler kayıp olarak adlandırılmaktadır [3].

Geçici durum davranışlarında sargılardaki gerilim dağılımının, izolasyon problemi oluşturmayacak biçimde farklı tiplerde sarılması [4], girdap akımı kayıplarının değişimini kısmen azaltırsa da [5], bu tasarım tiplerinin iletken kayıplarına etkisi büyük oranda olmayacaktır. İzole edilmiş alt iletkenlerle sargıların oluşturulmasının yanında daha iyi bir iletkenliğe sahip malzemelerin [6-7] kullanılması gerekecektir ki, maliyetler göz önüne alındığında, alüminyum veya bakır malzeme kullanımı güncelliğini halen devam ettirmektedir.

Yüksüz çalışma şartlarında dahi enerji sisteminden güç çeken transformatörde, çekirdek kayıpları olarak da adlandırılan, manyetik akının, çelik malzeme içinde ürettiği histerisiz kayıpları ve girdap akımı kayıpları boşa çalışma kayıplarını oluşturur. Histeriz ve girdap akımı kayıplarının hesaplamalara dahil edilmesi için matematiksel ifadeler geliştirilse de, deneysel yollarla ölçülen çekirdek kayıpları, hesaplamalarla elde edilen değerden daha büyük olmaktadır ve aradaki kayıp değeri literatürde anormal kayıplar olarak adlandırılmaktadır [8].

Histerisiz kayıpları; frekans, akı yoğunluğunun tepe değeri, kullanılan çekirdek çeliğinin tipi, çelik tanelerindeki akı yönlendirmelerine bağlı olarak değişir. Sistem frekansı hariç, bu sayılan faktörlerin hepsi, transformatör tasarımcısının tercihi ile değiştirilebilir [5]. Çekirdek kısmında oluşan kayıpların azaltılabilmesi için farklı manyetik özelliklere sahip malzemelerin kullanılması da [9] belirli maliyet kısıtları içinde dikkate alınmaktadır.

Çekirdek malzeme içinde oluşan girdap akımı kayıpları; çekirdek levhalarının kalınlığının karesi, frekansın karesi ve akı yoğunluğu etkin değerinin karesi ile orantılıdır [8]. Elektrik sisteminin frekansı sabit değerinde olması

* Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

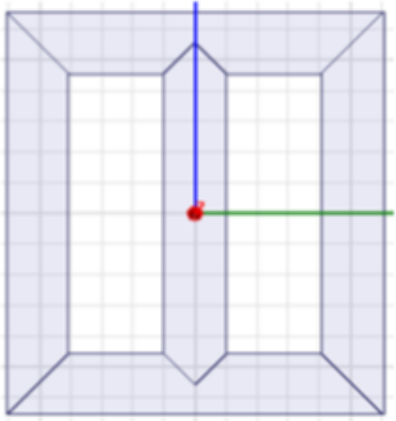
e-posta: ahmet.karademir@hotmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 389-397

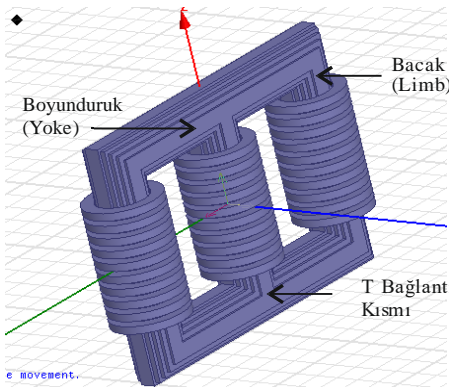
gerektiğinden, kayıpların azaltılması için ince çekirdek levhalarının kullanılması mümkünse de, ince saçların tasarımının gerektirdiği teknolojik birikim, fazladan bir maliyet olarak üretimi etkileyen bir unsur olacaktır.

Günümüzde orta ve büyük güçteki transformatör imalatçıları, kullanılan çekirdek saçının kesme esnasındaki çapaklardan kaynaklanan kayıplarını en aza indirmek için profesyonel kesme makineleri kullanılmaktadır [10]. Kesim esnasında saç levhası kenarı boyunca oluşan çapaklar, levhalar arasında elektriksel bir köprü oluşturmakta ve bu kısımlarda akan girdap akımlarına bağlı olarak kayıpların artmasına neden olmaktadır [5].

3 fazlı transformatör imalatlarında çekirdek tasarımları, Şekil-1'de görüldüğü gibi, 3 adet bacak kısmı ve 2 adet boyunduruk kısmı için olmak üzere, toplam 5 adet yığınlanmış paket ile transformatör çekirdeği oluşturulmaktadır [11]. Böylelikle transformatör çekirdeğinin 6 farklı kısmında hava aralığı oluşmaktadır. Bobinlerin sarmal yapısından dolayı oluşan hava aralığının etkisini azaltmak için ise Şekil-2'de görüleceği gibi iç kısımlardaki çekirdek genişlikleri daha büyük, dış kısımlardakiler ise daha küçük olarak tasarlanmakta ve adım kaydırma (step lap) tekniği ile çekirdek saçları dizilmektedir [10,12].



Şekil 1. 5 parçadan oluşan 3 fazlı transformatörün 2 boyutlu gösterimi (two-dimensional representation of 3-phase transformers consisting of 5 parts)



Şekil 2. Adım kaydırma tekniği dikkate alınarak tasarlanmış 3 fazlı transformatör modeli (3-phase transformer model designed with step lap technique)

2. TRANSFORMATÖR ÇEKİRDEK TASARIMLARI (TRANSFORMER CORE DESIGN)

Boşta çalışma şartlarında dahi güç tüketimi olan çekirdek kısmındaki kayıpların azaltılmasına yönelik çalışmalar hem deneysel [11-15] hem de benzetim çalışmaları [16-18] ile literatürde yer almaktadır. Transformatör çekirdeklerinin manyetik özelliklerini temel olarak, çekirdek malzeme kalitesi, çekirdek imalatı sırasında çelik levhanın işlenmesi ve çekirdek tasarımı olmak üzere üç faktör belirlemektedir [13]. Kayıpların %70'i'nin çekirdek kısmında olduğu güç transformatörlerinin, çekirdeğin oluşturulması esnasında, üst üste gelen bağlantı kısımlarının ve istifleme işleminde kullanılan deliklerden kaynaklanan kayıpların etkisinin de, çekirdek kayıpları içinde önemli bir yer tuttuğu bilinmektedir [16].

Farklı çekirdek tasarımlarında oluşturulan transformatörde, ölçülen toplam çekirdek kaybının, imalat öncesi çekirdeğin karakteristik olarak verilen kilogram başına kaybına oranı bulunarak elde edilen yapı faktörü tanımlaması, tasarımların kayıplarını karşılaştırmak amacıyla literatürde kullanılmaktadır [8,19]. Yapı faktörü küçük değerli olan çekirdek tasarımı, kayıplar açısından en verimli transformatörleri ortaya çıkarmaktadır.

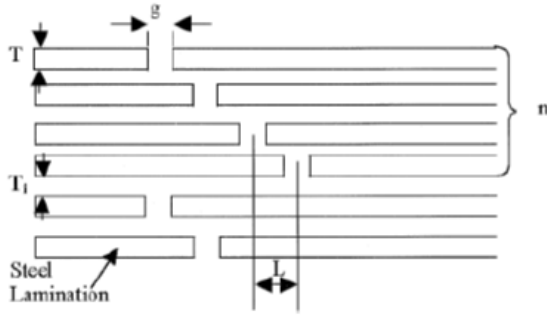
Yapılan bir çalışmada bacak kalınlıkları arttıkça yapı faktörünün büyüdüğü, dolayısıyla kayıpların arttığı belirtilmektedir. Aynı çalışmada, transformatör köşe kısımlarının tasarımında yapı faktörünün, 90° açıyla üst üste bindirilerek oluşturulan tasarımın, 45° açıyla oluşturulan tasarıma göre daha büyük değerde olduğu ve köşe kısımlarında üst üste binme uzunluğu arttıkça kayıplarda artış olduğu ortaya koyulmaktadır [13].

Kullanılan malzemelerin cinsine ve kalınlığına bağlı olarak, güç transformatörlerindeki kayıpların etkisinin incelendiği bir çalışmada, verim faktörü olarak yeni bir tanımlamanın dikkate alındığı, 1 fazlı transformatör tasarımlarının 3 fazlı olanlara göre daha iyi olduğu, ayrıca çekirdek boyutları ile kayıp azalımı arasında ilişki olduğu belirtilmektedir [14]. Büyük güçlü (20-150 MVA) 3 fazlı transformatörlerde verim faktörünün, 1 fazlı modellere yaklaştığı, çalışmada incelenen malzemeler içinde, lazer ile tanecikleri yönlendirilmiş malzemenin, diğer malzemelere göre veriminin en iyisi olduğu ve çekirdekte en fazla kayıpların T-bağlantı kısmında olduğu vurgulanmaktadır.

Adım kaydırma yönteminin çekirdek köşe noktalarında kayıplar üzerine etkisinin, adım kaydırma tekniği uygulanmayan tasarıma göre yapılan karşılaştırılmasında, manyetik akı yoğunluğuna bağlı olmak üzere %2 ile %4 arasında toplam çekirdek kaybında azalma olduğu belirtilmektedir [12].

Çekirdek tasarımında, adım kaydırma tekniği için laminasyon sayısının 4 ile 25 (Şekil-3) arasında değiştirilmesinin mümkün olduğu vurgulanan bir çalışmada, aynı tasarımı korumak için laminasyon sayısı artırılırken, çakışma uzunluğu azaltılması durumunda çekirdek kaybında net bir değişimin olmadığı, ancak sadece

çakışma uzunluğunun artmasına bağlı olarak kayıplarda artış olduğu sonucu ortaya koyulmaktadır [15].



Şekil 3. 4 laminasyonlu durum için adım kaydırmalı tasarım (step lap design for 4 laminated case)

Löffler ve arkadaşları, hava aralığı uzunluğu, her bir adım arası uzaklık ve her bir adımdaki laminasyon sayısının kayıplar üzerine incelemesini yapmışlardır [20]. Yapılan birçok deneysel karşılaştırma ile hava aralığı uzunluğunun güç kaybına açık etkisi olmasına rağmen, adımlar arası uzaklığın belirleyici bir parametre olmadığı belirtilmektedir. Çalışmada ortaya çıkan önemli bir sonuç ise, hava aralığına bağlı olacak kritik bir manyetik akı yoğunluğu değerinin grafiklerde ortaya çıkmasıdır. Laminasyon sayısı arttıkça, kritik manyetik akı yoğunluğu değerinde bir artış olduğu vurgulanmaktadır.

Ilo ve arkadaşları, Löffler'in çalışmasına atıfta bulunarak, laminasyon sayısı ile kritik akı yoğunluğuna bağlı bir indüksiyon penceresi oluşturmuşlardır [21]. Adımdaki laminasyon sayısının 8'den büyük olması durumundaki tasarımların, kayıplar açısından iyi sonuçlar vermeyeceği çalışmada ortaya koyulmaktadır.

Literatür taraması sonucu ele edilen bulgular irdelendiğinde, çekirdek tasarımları ile ilgili farklı görüşler ortaya atılmıştır:

- 1- Adım kaydırma (step lap) tekniğindeki, laminasyon sayısının 4 ile 25 arasında değişmesinin kayıplar üzerinde değişime neden olmadığı vurgulayan [15] ve laminasyon sayısı çok fazla arttıkça kayıpların artacağını belirten [20] çalışmalar mevcuttur.
- 2- Adım kaydırma tekniğinde, laminasyonların çakışma uzunluğunun önemli olduğunu vurgulayan [15] ve bunun önemsiz olduğunu belirten [21] çalışmalar mevcuttur.

Literatür taraması sonucunda, çekirdek tasarımları için aşağıda sıralanan konularda ortak bir bakış açısının olduğu görülmektedir:

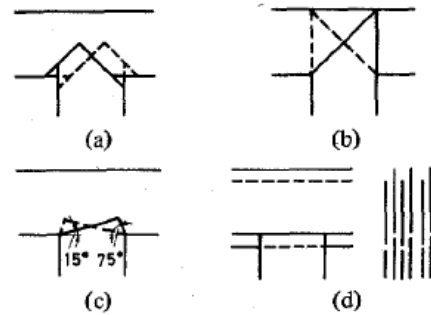
- 1- Transformatör kayıplarının önemli bölümü çekirdek kısmında oluşmaktadır.
- 2- Maliyet önemli değilse manyetik özelliği iyi malzemeler kullanılabilir.
- 3- Çekirdek levhanın işlenmesi önemlidir ve az çapak bırakan profesyonel kesim makinası kullanılması kayıpları azaltacaktır.

- 4- İstifleme deliklerinin çekirdek kayıpları üzerine önemli bir etkisi mevcuttur.
- 5- Çekirdek köşe kısımlarının 45° olarak tasarlandığı modelde kayıplar daha azdır.
- 6- Adım kaydırma (step lap) yöntemiyle çekirdek dizilimi, kayıpları azaltmaktadır.
- 7- Çekirdekte en fazla kayıplar T-bağlantı kısmında oluşmaktadır.

3. T-BAĞLANTI KISMI TASARIMLARI (DESIGN OF T-JOINT)

Transformatörde orta bacağın alt ve üst boyunduruk kısımları ile manyetik akı yolunun sağlanması için orta bacağın, kısmen boyunduruklara doğru uzatılarak tasarım yapılması imalat sürecinde devam eden bir uygulamadır [10]. T-bağlantı kısmı olarak adlandırılan bu kısımda, orta bacağın kaç derecelik açıyla boyunduruk kısımlarına uzatılması noktasında literatürde farklı bakış açıları mevcuttur.

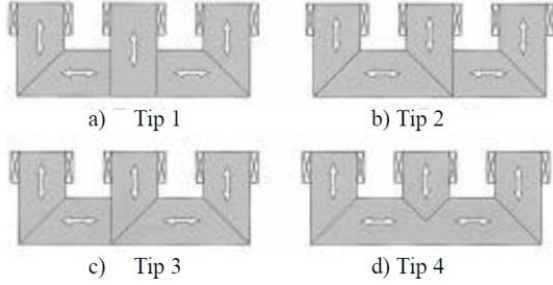
Çekirdek tasarımları konusunda en çok deneysel çalışmayı yapan Valkovic, farklı T-bağlantı kısmı tasarımları için de çalışmalar yapmıştır [13]. Bu çalışmada, günümüzde çok yoğun olarak kullanılan Şekil-4 (a) ve (b)'deki tasarımların yanında iki yeni tasarım olan Şekil-4 (c) ve (d)'de verilen tasarımlar dikkate alınarak, yapı faktörleri açısından değişimler incelemiştir. Kayıplar açısından en iyi tasarımdan, kötü tasarıma doğru sıralamanın 4-(d), 4-(c), 4-(a) ve 4-(b) şeklinde olduğunu vurgulamıştır. Valkovic, bu çalışmada, en iyi tasarımın Şekil 4-(d)'deki tasarım olduğunu belirtmesine rağmen, bu sonucun 45°-90°-45°'lik (Şekil-4-(a)) T-bağlantı açısının en iyi bağlantı formu olduğuna ilişkin bilinenin aksine bir durum oluşturduğunu vurgulamaktadır.



Şekil 4. Farklı T-bağlantı tasarımları (different T-joint designs)

Soda ve Enokizono, kendilerinin geliştirdikleri ve malzemenin histerisiz davranışını da içeren, E&S adını verdikleri matematiksel model üzerinden sonlu elemanlar yöntemini kullanarak T-bağlantı kısımlarındaki tasarımların çekirdek kayıpları üzerine etkisini incelemişlerdir [17]. 3 fazlı transformatör çekirdeklerinin T-bağlantı kısmında dönel güç kaybının üretildiğini, genellikle dönel güç kaybının, alternatif güç kaybindan daha büyük olduğunu belirtmektedirler. Bu nedenle

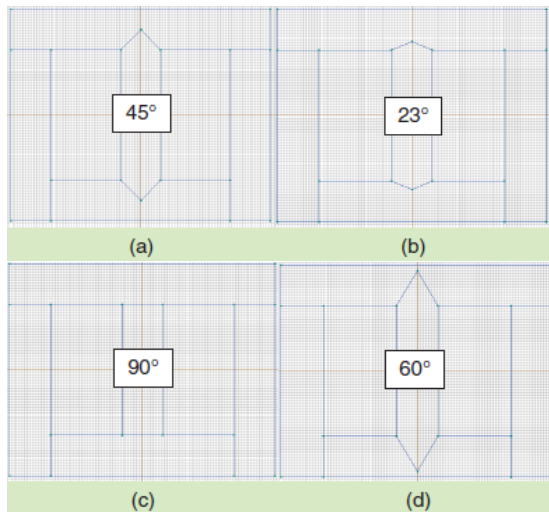
T-bağlantı kısmının optimum olarak tasarlanmasının önemi vurgulanmakta ve Şekil 5’de görüldüğü gibi 4 farklı tip T-bağlantı kısmına ilişkin model üzerinde inceleme yapıldığı belirtilmektedir.



Şekil 5. 4 farklı T-bağlantı kısmı tasarımı (4 different T-joint designs)

Bu tasarımlardan kayıplar açısından iyiden kötüye doğru sıralamanın Tip-4 ($45^\circ-90^\circ-45^\circ$ ’lik tasarım), Tip-3, Tip-2 ve Tip-1 şeklinde olduğu belirtilmektedir [17]. Çalışma sonucunda, simetrik tasarım yapısına sahip Tip-2 ve Tip-3 için birbirinden çok farklı kayıp değerlerinin elde edildiği, ayrıca 7 parçadan oluşan (8 bağlantı kısmında hava aralığı mevcut) Tip-3 ile 5 parçadan oluşan (6 bağlantı kısmında hava aralığı mevcut) Tip-4 için oluşturulan güç kaybı eğrilerinin birbirine çok yakın olduğu belirtilmektedir.

Haidar ve Al-Dabbagh yapmış oldukları çalışmada, QuickField sonlu elemanlar manyetik modelleme programını kullanarak, Şekil-6’da görülen $45^\circ-90^\circ-45^\circ$ (a), $23^\circ-134^\circ-23^\circ$ (b), $90^\circ-0^\circ-90^\circ$ (c) ve $60^\circ-60^\circ-60^\circ$ (d) T-bağlantı açılımlarına sahip, 1 MVA gücündeki güç transformatörünü modellediklerini vurgulamaktadırlar. Bu sonuçlara göre, toplam kayıpların en az olduğu güç transformatörü tasarımlarının sırasıyla Şekil-6’daki (d), (a), (c) ve (b) şıklarında verilen tasarımlar olduğu belirtilmektedir [18]. Bu sonuçlar dikkate alındığında, bağlantı açısının büyümesi veya küçülmesinin kayıplar üzerine doğrusal artış veya azalışının olmadığı görülmektedir.

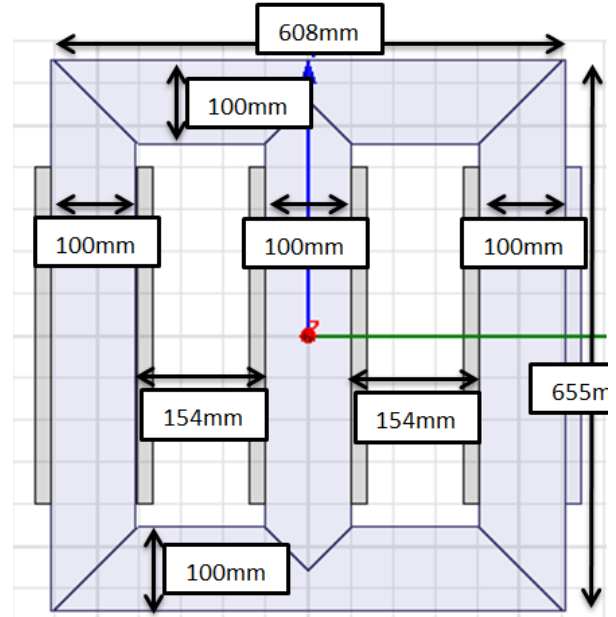


Şekil 6. Farklı T-bağlantı modelleri (different T-joint designs)

DeneySEL çalışmalarla sonuca ulaşan Valkovic, T-bağlantı açısı düştükçe kayıpların azaldığına ilişkin bir sonuca doğru yaklaşım ortaya çıkarırken, benzetim çalışmalarıyla konuyu irdeleyen diğer iki çalışmanın sonuçları, konunun net olarak analiz edilmesini mümkün kılmamaktadır. Transformatör kayıplarının en fazla çekirdek kısmında, çekirdek kısmında en fazla kayıpların da T-bağlantı kısmında olduğu dikkate alındığında, kayıpların en az olduğu, T-bağlantı tasarımının belirlenmesi, çekirdek tasarımlarında en fazla kaybın olduğu bu kısım için uygun tasarımın ortaya çıkarılmasını sağlayacaktır.

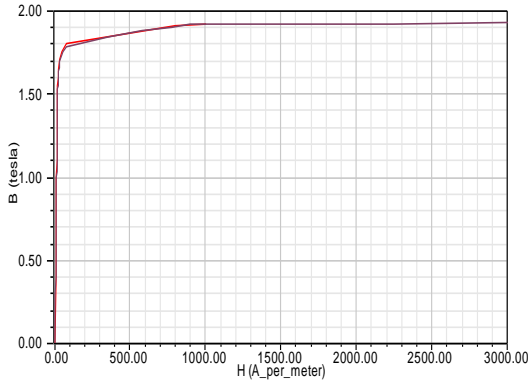
4. FARKLI T-BAĞLANTI AÇILARI İLE YAPILAN BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS OF DIFFERENT T-JOINT)

Bu çalışmada, anma değerleri 33kV/0.4kV, 50 kVA olan 3 fazlı transformatörün manyetik analizleri için, çekirdek malzemesi olarak yoğun biçimde üretimde kullanılan 0.23 mm kalınlığındaki M5 manyetik sacı tercih edilmiştir. Benzetim sırasında, 50 kVA gücündeki transformatör boyutları için Şekil-7’deki ölçüler kullanılmış ve çekirdek derinliği 100 mm ve parçalar arası hava aralığı ise 2 mm olarak alınmıştır.

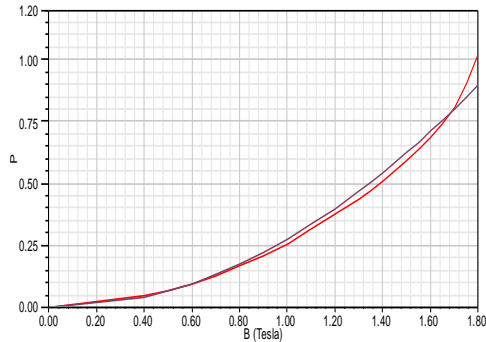


Şekil 7. Benzetimi yapılan 3 fazlı transformatörün boyutları (dimensions of 3-phase transformer analyzed at this study)

Analizler esnasında, 0.23 mm kalınlığındaki, M5 manyetik malzemesinin B-H (B-akı yoğunluğu, H-manyetik alan şiddeti) karakteristiği için Şekil-8’deki, B-P (B-akı yoğunluğu, P-malzemenin kg başına güç kaybı) karakteristiği için ise Şekil-9’daki eğriler kullanılmıştır [22]. Malzemenin kütle yoğunluğu ise 7650 kg/m^3 olarak alınmıştır.



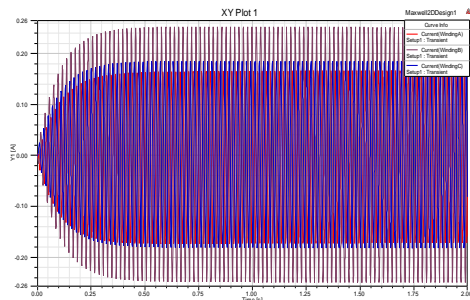
Şekil 8. M5-0.23 malzemesinin B-H eğrisi (B-H curve of the M5-0.23 material)



Şekil 9. M5-0.23 Malzemesinin B-P Eğrisi (B-P curve of the M5-0.23 material)

Analizler, Ansoft Maxwell paket programı kullanılarak yapılmıştır [23]. Ansoft Maxwell manyetik modelleme programı ile yapılan benzetimler sırasında, programın özelliklerinden kaynaklandığı anlaşılan çeşitli problemler ile karşılaşmıştır.

Anma değerinde sargılara gerilimler uygulanarak benzetim çalışması yapılması durumunda, başlangıç değerleri sıfır olan 3 fazlı akımların, sürekli durum değişimleri için ortaya çıkan eğrilerde, faz farklarının 120° dereceden farklı olduğu ve sinüzoidal forma sahip olmadıkları gözlenmiştir. Benzetim programının başlangıç koşullarına çok fazla bağlı olduğu dikkate alınarak, akımların sıfır başlangıç değerinden yavaş bir formda artışının sağlanması için 0.5 sn sonrasında geçici durumunun ortadan kalkacağı bir eksponansiyel bir büyüklükle besleme gerilimlerin çarpılması yolu tercih edilmiştir (Şekil-10).



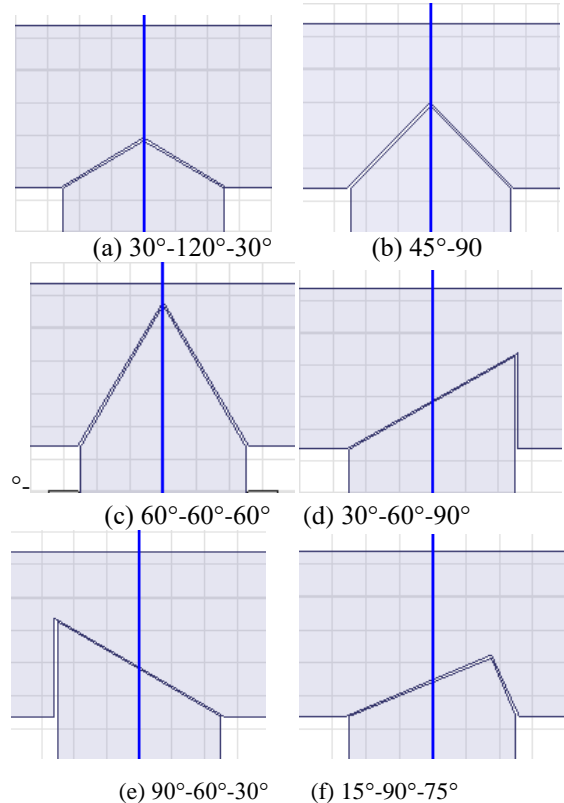
Şekil 10. Sargılara uygulanan eksponansiyel artımlı 3 faz gerilim değişimleri (Exponential incremental sinusoidal voltage applied to windings of 3-phase transformer)

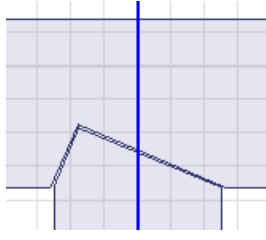
Yaşanan başka bir problem ise benzetimi yapılan elemanın sınır koşullarının sonlanacağı bölgenin belirlenmesidir. Program, benzetimi yapılan elemanın boyutlarını dikkate alarak % cinsinden analiz yapılacak alanı başlangıç için %100 olarak belirlemesine rağmen, bu büyüklükteki bir transformatör için bu bölgenin %50 olmasının yeterli olduğu belirlenmiştir.

Karşılaşılan diğer bir problem ise analiz esnasında hesap adımları arasında geçen süredir. Programda bu süre için 0.01 sn tanımlaması yapılmasına rağmen, akım eğrilerinin düzgün bir sinüzoidal formda elde edildiği sonuçlar için bu sürenin 0.0001 sn olması gerektiği belirlenmiştir. Bu değişiklikler sonucunda programın analizler için harcadığı toplam süre 12 saat değerine kadar ulaşmıştır.

4.1. Benzetim İçin Oluşturulan T-bağlantı Formları (T-joints Designs For Simulation)

Çalışmada 7 farklı T-bağlantı formu kullanılmış ve analizler yapılarak programın akım ve güç değişimlerini üretmesi sağlanmıştır. Şekil-11'de analizi yapılan T-bağlantı formları görülmektedir. Simetrik açıyla boyun-duruk kısmına uzanan (a), (b) ve (c) formları yanında, Valkovic'in $15^\circ-90^\circ-75^\circ$ 'lik tasarımı [13] dikkate alınarak taban açıları eşit olmayan modeller için de analizler yapılmıştır. Valkovic'in $15^\circ-90^\circ-75^\circ$ 'lik tasarımında bir adım grubu bu açıyla dizilirken, bir üstteki adım grubu $75^\circ-90^\circ-15^\circ$ 'lik düzende dizilerek simetri oluşturulmasına rağmen, böyle bir analiz için 3 boyutlu bir inceleme gerekeceği için ve benzetim süresinin 2 boyutlu inceleme için bile yeterince büyük olmasından dolayı Valkovic'in tasarımından farklı olarak, 2 farklı açı grubu ($15^\circ-90^\circ-75^\circ$ veya $75^\circ-90^\circ-15^\circ$ olarak) ayrı ayrı analiz edilmiştir.



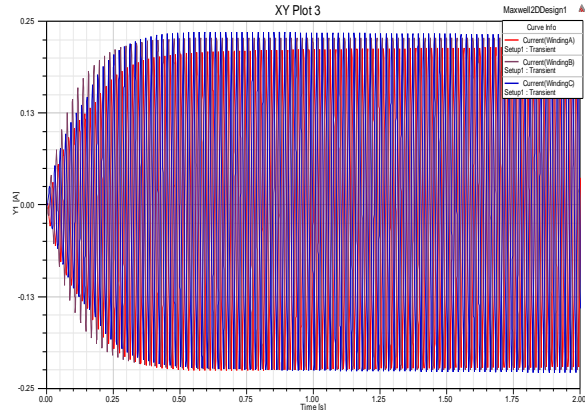


(g) 75°-90°-15°

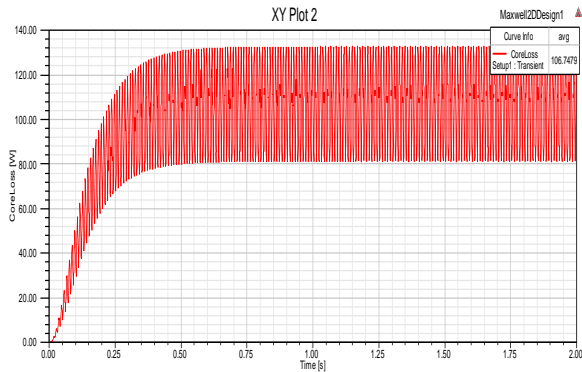
Şekil 11. Analizi yapılan farklı T-Bağlantı formları (different T-joint designs analysed at this study)

4.2. Farklı T-Bağlantı Formları İçin Akı Yoğunluğu ve Kayıpların Değişimi (Flux Density and Loss Variations for Different T-joint Forms)

Ansoft Maxwell programı kullanılarak her model için yapılan analiz sonrasında sargılardan çekilen akım ve çekirdek kısmında tüketilen değişimler için grafikler oluşturulmuştur. Faz akımlarının sürekli durum değerlerine 0.5 sn'de ulaşmasından dolayı toplam benzetim süresi 2 sn alınmıştır. 45°-90°-45° T-bağlantılı model için sargı akımlarının değişimi Şekil-12'de, çekirdek kayıplarının değişimi ise Şekil-13'de, görülmektedir.

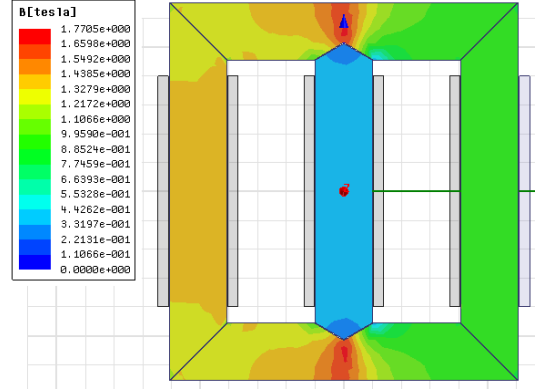


Şekil 12. 45°-90°-45° T-bağlantılı model için sargı akımlarının değişimi (changing of winding current for 45°-90°-45° T-joint design)

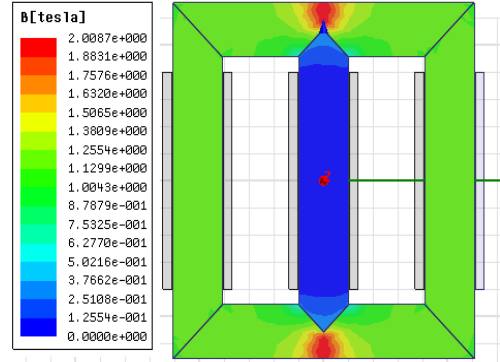


Şekil 13. 45°-90°-45° T-bağlantılı model için çekirdek kayıplarının değişimi (changing of core loss for 45°-90°-45° T-joint design)

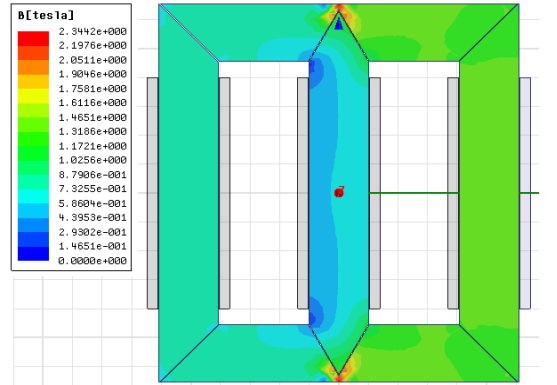
Benzetimler sonucu, farklı T-bağlantı formları için maksimum akı yoğunluğunun elde edildiği anlara ilişkin değişimler Şekil-14'de verilmektedir.



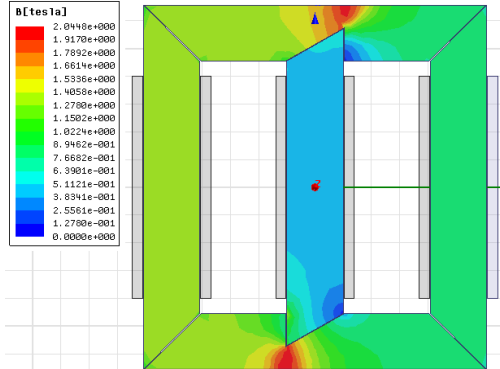
(a) 30°-120°-30°



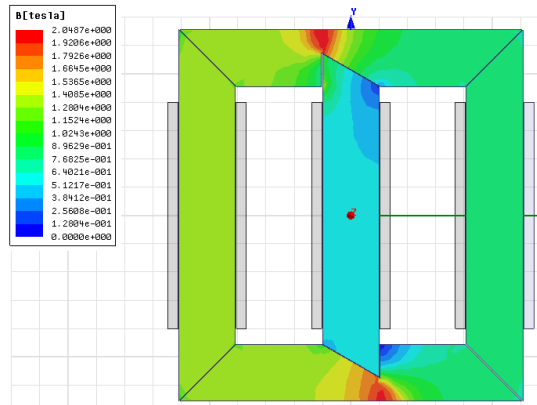
(b) 45°-90°-45°



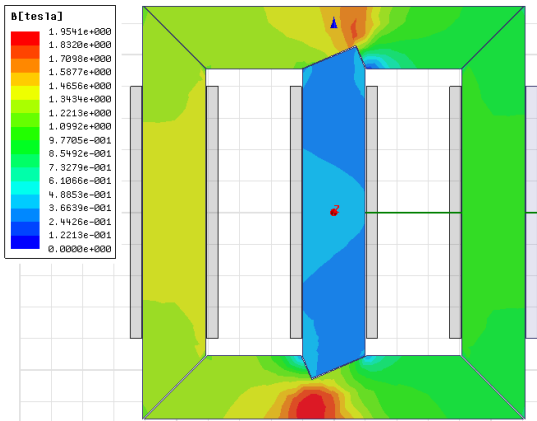
(c) 60°-60°-60°



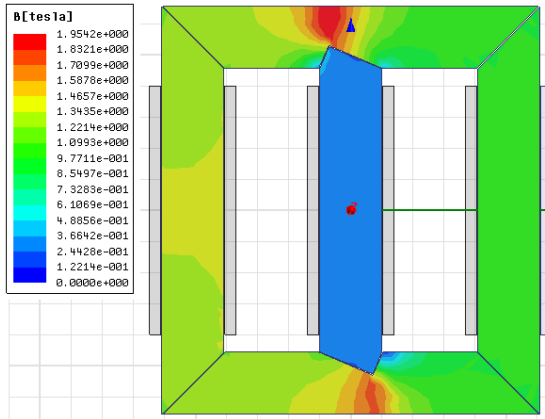
(d) 30°-60°-90°



(e) 90°-60°-30°



(f) 15°-90°-75°



(g) 75°-90°-15°

Şekil 14. Farklı T-Bağlantı formları için akı yoğunluğunun maksimum anlarına ilişkin değişimler (changing of flux density for the different T-joint forms)

Şekillerden görüleceği gibi T-bağlantı kısmı etrafında akı yoğunluğu maksimum değerlere ulaşmaktadır. Çekirdek kayıpları akı yoğunluğu ile orantılı olarak arttığından, bu kısımlardaki kayıp değerleri ve dolayısıyla ısınmalar diğerlerine göre daha büyük olacaktır.

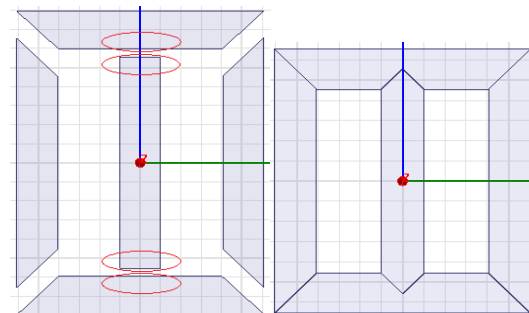
Çizelge 1. Farklı tasarımlar için maksimum akı yoğunluğu ve kayıp değerleri (maximum flux density and loss values for different designs)

T-bağlantı tasarım tipi	Ortalama çekirdek kaybı (W)	Maksimum akı yoğunluğu (T)
30°-120°-30°	104.2259	1.7705
75°-90°-15°	105.3891	1.9542
15°-90°-75°	105.4957	1.9541
45°-90°-45°	106.7479	2.0087
30°-60°-90°	107.7174	2.0448
90°-60°-30°	107.7305	2.0487
60°-60°-60°	108.9477	2.3442

Farklı T-bağlantı tasarımları için maksimum akı ve ortalama kayıp değerleri Çizelge-1'de verilmektedir. Kayıp değeri hesaplamaları için akımların sürekli durum değerine ulaştığı 0.5 sn ile 2 sn arasındaki ortalama değerler alınmıştır. Çizelgeden görüleceği gibi, orta bacağın, boyunduruk kısımlarına uzanma mesafesi arttıkça, çekirdek kayıplarında da artma oluşmaktadır. Yapılan çalışmada T-bağlantı kısmının en az uzama mesafesine sahip tasarımlardan birisi olan 30°-120°-30°'lik tasarımın, kayıplar açısından en iyi model olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca benzetim programının, simetrik yapıya sahip 75°-90°-15° ve 15°-90°-75° ile 30°-60°-90° ve 90°-60°-30° T-bağlantı tasarımlarının maksimum akı yoğunluğu ve ortalama çekirdek kaybı değerleri açısından birbirine yakın değerler ürettiği görülmektedir.

4.3. Çekirdek Kesim İşleminde Atıl Malzemeler (Discarded Material for Process of Cutting Core)

Çekirdek imalatında kullanılan ve rulolar halinde üretim tesisine gelen saçlar, uygun genişliklerde dilimlendikten sonra köşe kısımların ve T-bağlantı kısımlarının oluşturulması için kesim makinasında kesilir [10]. Özel kesim makinaları köşe kısımlarını 45°'lik açıyla kesmektedir ve bu kısımlarda kesimlerden kaynaklanan atıl malzeme oluşmamaktadır. Orta bacak ve boyundurukların kesiminde ise Şekil-15'de görülen kısımlar için atıl malzeme ortaya çıkmaktadır.



Şekil 15. Orta bacak ve boyunduruk kısımlarında kesim öncesi ve sonrası durum (situations for leg and yoke parts before cutting and after that)

Analizi yapılan 7 farklı tip T-bağlantı yapısına ilişkin ortaya çıkan atıl malzeme miktarı Çizelge-2’de verilmektedir. Çizelgeden görüleceği üzere boyunduruk kısmına doğru en az uzamayı 15° - 90° - 75° açılara sahip tasarım yapmaktadır. Bu çalışmada incelenen ve boyunduruk kısmına en fazla uzamayı yapan 60° - 60° - 60° ’lik tasarım, ilk tasarıma göre atıl malzeme açısından %246 daha fazla saçın kesilerek hurdaya atılmasına yol açacaktır.

Çizelge 2.Farklı tasarımlar için atıl malzeme değişimleri (changing of discarded material for different designs)

T-Bağlantı açıları (derece)	Orta bacak uzunluğu (mm)	Toplam atıl malzeme miktarı (mm ²)	İlk tasarıma göre artış (%)
15-90-75	505	5000	0
30-120-30	512,7	5773	13,4
45-90-45	555	10000	100
30-60-90	570,4	11547	131
60-60-60	628,2	17320	246

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, 2’şer tanesi simetrik yapıya sahip olmak üzere 7 farklı tasarım dikkate alınarak, transformatör T-bağlantı modellerine göre çekirdek kayıpları ve atıl malzeme miktarındaki değişimler analiz edilmiştir. Çekirdek kesim makinesi üretici firmaların ortaya koyduğu çözüme bağlı olarak, T-bağlantı kısmı için 45° - 90° - 45° açılarla yürütülen kesim modeli dışında, 15° - 90° - 75° , 30° - 120° - 30° , 30° - 60° - 90° ve 60° - 60° - 60° T-bağlantı tasarımları dikkate alındığında, kayıplar açısından en iyi tasarımın uygulamada kullanılan modelden farklı olarak 30° - 120° - 30° ’lik açığa sahip tasarım olduğu görülmektedir. Atıl malzeme açısından ise 15° - 90° - 75° ’lik tasarıma sahip modelin, şu an üretimde kullanılan modele göre %50 oranında hurda malzeme azalmasına yol açacağı anlaşılmaktadır. Çalışmadan elde edilen bulgular neticesinde, kayıpların en az olduğu 30° - 120° - 30° ’lik model ve atıl malzemenin en az olduğu 15° - 90° - 75° ’lik model dikkate alındığında, orta bacak boyunun boyunduruklara uzanan kısmının mümkün olduğunca kısaltılmasının hem kayıplar, hem de atıl malzeme açısından iyileştirmeye neden olacağı sonucu ortaya çıkmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

[1] Amoiralis E.I., Tsili M.A., and Kladas A.G., "Transformer design and optimization : A Literature Survey", *IEEE Trans. Power Del.*, 24(4): 1999-2024, (2009).

[2] Lopez-Fernandez X.M., Ertan H.B., Turowski J., "Transformers Analysis, Design, and Measurement", *CRC Press*, (2013).

[3] Georgilakis P.S., "Spotlight on modern transformer design", *Springer*, London (2009).

[4] Bharat Heavy Electrical Limitids, Transformers, *McGraw-Hill Education*, (2005).

[5] Winders J.J., "Power Transformers Principles and Applications", *CRC Press*, (2002).

[6] Sykuiski J.K. ve diğerleri, "Prospects for large high-temperature superconducting power transformers: conclusions from a design study", *IEEE Proceedings: Electric Power Applications*, 146(1): 41-52, (1999).

[7] Sykuiski J.K., Goddard K.F., Stoll R.L., "A Method of estimating the total AC loss in a high- temperature superconducting transformer winding", *IEEE Trans. On Magnetics*, 36 (4): 1183-1187, (2000).

[8] Kulkarni S.V., Khaparde S.A., "Transformer Engineering Design, Tecnology, and Diagnostics", *CRC Press*, (2013).

[9] Işık F., Uyaroğlu Y., "Amorphous core transformers efficiency analysis in Turkish electrical distribution systems", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, DOI: 10.3906/elk-1312-147

[10] GEORG Co., "GEORG (Convincing with outstanding solutions) Brochure", http://www.georg.com/cms/files/pdf/trafoanlagen/trafoanlagen_Imagebroschuere-EN.pdf, (2015).

[11] Ramsis S.G., teNijenhuis E.G., "Experimental investigations on effect of core production attributes on transformer core loss performance", *IEEE Trans. On Power Delivery*, 13(2): 526-531, (1998).

[12] Valkovic, Z., Rezic A., "Improvement of transformer core magnetic properties using the step-lap design", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 112(1-3): 413-415, (1992).

[13] Valkovic, Z., "Influence of Transformer Core Design on Power Losses", *IEEE Trans. Magn.*, 18(2): 801-804, (1982).

[14] Valkovic Z., "Recent Problems of Transformer Core Design", *Physica Scripta*, 24: 71-74, (1988).

[15] Oliveras J.C., Perez R.E., "Reducing Losses in Distribution Transformers", *IEEE Trans. On Power Delivery*, 18(3): (2003) .

[16] Hajipour E., Vakilian M., Ghafouri M., " A Novel Fast FEA No-Load Loss Calculation Method for stacked core three phase distribution transformers", *Int. Trans. Elec. Comp. Eng. Sys.*, 2(1): 34-38, (2014).

[17] Soda N., Enokizono M., "Improvement of T-Joint Part Constructions in three phase transformer by using direct loss analysis with E&S model", *IEEE Trans. Magn.*, 36(4): 1285-1288, (2000).

[18] Haidar, M.A. and Al-Dabbagh, "The influences of T-Joint core design on the no load losses in transformers", *IEEE Potentials*, 40-46, (2013).

[19] Vecchio R.M.D., Poulin B., Feghali P.T., Shah D.M., Ahuja R., Transformer design principles with applications to core-form power transformer, *CRC Press*, (2010).

[20] Löffler F., Booth T., Pfützner H., Bengtsson C., Gramm K., " Relevance of step-lap joint for magnetic characteristics of transformer cores", *IEE Proc. Power Appl.*, 142(6): 371-378, (1995).

- [21] Ilo A., Pfützner H., Nakata T., “Critical induction - a key quantity for the optimisation of transformer core operation”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216: 637-640, (2000).
- [22] Beckley, P., “Electrical Steels for rotating machines”, *The Institution of Engineering and Technology, Stevenage*, (2002).
- [23] ANSYS Co. “Maxwell Electromagnetic Field Simulation Software Brochure”,
<http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/brochure/ansys-maxwell-brochure.pdf>, 02.09.2015.

Döger (İhsaniye-Afyon) Tüflerinin Doğal Yapı Taşı Olarak Teknolojik Özellikleri ve Mevlevi (Türbe) Cami Restorasyonu

Mustafa Yavuz ÇELİK*, Gaye TAN**

* Afyon Kocatepe Üniv. Afyon Meslek Yüksek Okulu, Doğal Yapıtaşları Teknolojisi Programı,
Ali Çetinkaya Kampüsü, 03100, Afyonkarahisar

** Maden Mühendisi, Serbest

(Geliş / Received : 07.01.2016 ; Kabul / Accepted : 15.05.2016)

ÖZ

Tüfler, gözenek oranı çok yüksek olan volkanik kayalardır. Tüflerdeki gözenek miktarı fiziksel ve mekanik özelliklere etki etmektedir. Bu çalışmada Mevlevi (Türbe) Cami (Afyonkarahisar) restorasyonunda kullanılan Döger (İhsaniye) tüflerinin özellikleri incelenmiştir. Ocaktan alınan tüf örnekleri standartlardaki boyutlara göre kesilmiş, petrografik (polarizan mikroskop), mineralojik (XRD ve SEM) ve kimyasal analizleri (XRF) yapılmıştır. Örneklerin fiziko mekanik özellikleri TSEN standartlarına uygun olarak yapılmıştır Döger tüfü, diğer doğal yapıtaşlarına göre daha düşük mekanik özellikler göstermektedir. Ancak bu tüflerin bölgedeki Selçuklu ve Osmanlı tarihi yapılarında kullanıldığı ve bu yapılarında günümüze kadar sağlam bir şekilde geldiği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapı taşı, Tüf, Restorasyon, Fiziko-mekanik özellikler.

Technological Features of the Döger (İhsaniye-Afyon) Tuffs as Natural Building Stones and Mevlevi (Turbe) Mosque Restoration

ABSTRACT

Tuffs are volcanic rocks with very high porosity ratio. This affects both physical and mechanical properties of these rocks. In this research, characteristics of Döger (İhsaniye) tuffs, which were used for the restoration of Mevlevi (Turbe) Mosque were studied. Tuff samples are cut according to the standard sizes, then; petrographic (polarizing microscope), mineralogical (XRD and SEM), and chemical analysis (XRF) were employed for the characterization. Physio-mechanical properties of the samples were determined according to the TSEN standardization. The Döger tuffs have lower strength and endurance considering the other building stones. However, these tuffs were used in historical buildings for Seljuk and Ottoman architectures and these structures have withstood firmly until today.

Keywords: Building stone, Tuff, Restoration, Physico-mechanical properties

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Doğal taşlar, insanlar tarafından bilinen ve kullanılan en eski inşaat malzemelerinden birisidir. İnsanlar kil ve ahşaptan yapılmış yerlerde ikamet ederken bile, çeşitli anıtsal yapılarında doğal taşları kullanmışlardır. 20. Yüzyıla kadar Avrupa'da önemli ve büyük binalarda tuğla yerine kesme taşlar kullanılmaktaydı. Anadolu topraklarında da özellikle Eski Yunan, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı dönemlerinde doğal taştan yapılmış sayısız eser bulunmaktadır. Selçuklu ve Osmanlı mimarisinde kireçtaşı ve tüfler büyük bir ustalıkla işlenerek cami, medrese ve han gibi binaların dış ve iç mekânlarını süslemiştir [1].

Anadolu'da; Hitit, Eski Yunan, Roma, Bizans, Selçuklu ve Osmanlı uygarlık dönemlerine ait eserlerde de tüflerin kullanıldığı görülmektedir. Bu eserlerin inşasında kullanılan doğal taşların elde edildiği taş ocaklarından bazıları halen çalışmaktadır. Anadolu Selçuklu döneminde, daha çok Orta ve Doğu Anadolu'daki tüflerle, ünlü medreseler, camiler, türbeler, kervansaraylar inşa edilmiştir. Özellikle Orta Anadolu'da çeşitli şehirlerde renkli ve volkanik tüflerden yapılan eserler, günümüzde de işlevlerini sürdürmektedir.

Selçuklu ve Osmanlı Dönemi yapıları ile tarihi dokunun yaşatıldığı ve Anadolu'daki Türk kültürünü yansıtan önemli eserlerin yer aldığı illerden birisi de Afyonkarahisar'dır. Afyonkarahisar'da günümüze kadar gelebilen cami, medrese, köprü ve han gibi genel kullanıma açık tarihi yapıların yanı sıra, çeşme, hamam,

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: mycelik@aku.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 399-408

bent ve su kemeri gibi su mimarisi yapıları da önemli bir yer tutmaktadır. Bu tarihi yapıların birçoğunda Ayazini ve Seydiler tüfleri kullanılmıştır [2].

Tarih boyunca farklı kültürleri ve manevi inanışları temsil eden ibadet yapıları gibi anıtsal yapılar, korunması gereken kültür varlığı olarak kayıt altına alınmış önemli mimarlık yapılarıdır. Afyonkarahisar şehir merkezinde de tarihin derinliklerinden günümüze kadar gelen tarihi camiler hala mevcudiyetlerini sürdürmektedir. Bu camilerin en önemlilerinden birisi de Mevlevi (Türbe) Camisidir. Mevlevi (Türbe) Cami yapımında kullanılan taşların ağırlıklı olarak, Afyonkarahisar civarında bol olarak bulunan volkanik kayalar olduğu anlaşılmıştır. Yer yer trakit gibi volkanik kayaların kullanıldığı görülmekle beraber ağırlıklı olarak tüfler yapı malzemesi olarak kullanılmıştır.

Tüfler piroklastik kayalar içerisinde tanımlanırlar. İyi pekişmemiş tüfler, zaman içerisinde bol gözenekli yapısı nedeniyle diğer doğal taşlara göre daha çabuk ayrışmaktadır. Tüfler bileşenlerine göre sınıflandırıldıklarında üç ana bileşen vardır: cam bileşenler (pümis, cam), kristal bileşenler ve kayaç parçası (litik) (Schmid 1981) [3]. Tüflerin dayanımı, bileşimde yer alan minerallere, boşluk miktarına, kimyasal bileşimine ve cam içeriğine göre değişmektedir. Tüfler ocaktan çıkarıldığında bir miktar doğal nem içeriğinden dolayı kolay şekillendirilmektedir. Yapıtışı olarak kullanılacak tüfler hemen kullanılmaz, işlendikten sonra açık havada kurumaya bırakılır ve bu süreçte sağlam kalanlar kullanılır. Önemli yapılarda yapıtaşı olarak kullanılacak kayaların kullanıldığı yerde deformasyona uğramamaları için kullanılmadan önce bir takım tekniklerle denetlenmesi gerekmektedir. Boşluklu yapısından dolayı tüflerin, iklim koşulları ve yıprandırıcı atmosfer etkileri karşısında gösterdiği değişiklikler, tarihi camilerin yapımında kullanılan tüflerde de sıklıkla gözlenmektedir. Bu değişiklikler, tüflerin tanelerinin ayrışarak parçalanması ve ana kütlede ayrılmaları şeklinde gerçekleşmektedir.

Literatürde Afyonkarahisar yöresinde yapıtaşı olarak kullanılan Ayazini tüfleri ile ilgili çeşitli araştırmalara rastlanmakta olup; bu çalışmalar Ayazini tüflerinin jeolojisi, çimento sanayinde kullanımı, yapı taşı olarak kullanımı ve dayanımları konularında yapılmıştır [4, 5, 6, 7, 8, 9]. Döğer tüfleri ile ilgili hiç bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu çalışmada Afyonkarahisar'da bulunan tarihi camilerden Mevlevi (Türbe) Cami restorasyonu ve restorasyonda kullanılan Döğer-İhsaniye bölgesi tüflerinin petrografik (polarizan mikroskop), mineralojik (XRD ve SEM) kimyasal (XRF) ve fiziko mekanik özellikleri incelenmiştir

1.1. Mevlevi (Türbe) Cami Tarihi (History of the Mevlevi (Türbe) mosque)

Mevlevi Cami önceden Mevlevi zaviyesi olarak tesis edilmiştir. Anadolu'da ilk tesis edilen Mevlevihaneler içerisinde bulunan Afyonkarahisar Mevlevihanesi'nin ne

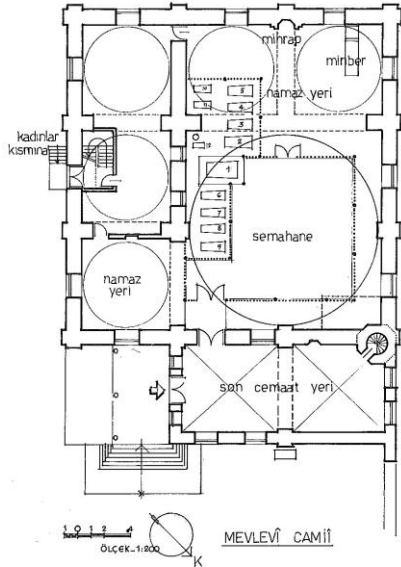
zaman kurulduğu hususunda kesin bir tarih olmamakla birlikte, çeşitli çalışmalarda muhtelif görüşler beyan edilmiştir. XIII. Yüzyıl sonlarında 1294-95/H.694 asitane olarak mevcut olan Mevlevihane'nin Germiyan Alishir oğlu Yakup Han'ın Mehmet Celeleddin oğullarından Mehmet Bahaeddin Veled oğlu Mehmet ve evlatlarına düzenlediği vakfı vardır. Vakfiyesi Yıldırım Bayezid döneminde 1392 yılında yenilenmiştir. Şehirde çıkan yangınlardan etkilenen Mevlevihane'nin birkaç kez yandığı, tamir ve genişletme çalışmaları sırasında da bir takım değişikliklerin yapıldığı anlaşılmaktadır. 1683 yıllarında Kara Mustafa Paşa zamanında yanan dergâh yenilenir. 1842 yılında Abdülmecid onarımında bulunur. 1905 yılında Abdülhamit II. bugünkü biçiminde yaptırır. Daha sonra 1962 yılında Mimar Arif Turunç, kubbe kurşunlarını değiştirmiş, kubbeyi onarmış, son cemaat yeri duvarlarını kesme taş kaplatmıştır. 1962 yılında minare yıkılarak yeniden yapılmıştır. Yapı kesme taş olup minaresi de taştan yapılmıştır (Şekil 1). 1925 yılında tekke ve zaviyelerin çalışmalarının iptali kanunu ile kapatılmış, böylelikle yaklaşık altı asır süre gelen Mevlevi Zaviyesi'nin faaliyetleri sona ermiştir [10].

Mevlevihane Afyonkarahisar şehir merkezi, Zaviye Sultan Mahallesi, Akmesit Caddesi arasında bulunmaktadır. Yapı, ana mekân ile bahçesinde yer alan çeşitli birimleriyle yaklaşık 5.000 metrekarelik bir alan üzerindedir. Neo-klasik ve Türk Barok üslubu özelliğinde inşa edilmiştir. Afyonkarahisar Mevlevihanesi'nde, semahane yan tarafında sema edenleri seyir edercesine on iki adet sanduka bulunmaktadır. Bunlardan birisi de Mevlana'nın torunlarından Sultan Divani'ye aittir. Cami girişinin yan boşluğunda Namık Kemal'in annesi Fatma Zehra Hanım'ın mezarı bulunmaktadır [10].

1.2. Mevlevi (Türbe) Cami Restorasyonu (Restoration of the Mevlevi (Türbe) mosque)

Mevlevi (Türbe) Cami Restorasyonu 2008 yılında yapılmıştır. Cami yapısında kullanılan doğal taşlarda yenileme, onarılan kısımlardaki ve bozmuş yapı elemanlarına da bütünleme işlemi uygulanmıştır. Mevlevi (Türbe) Cami Restorasyonu sırasında öncelikle bozularak ayrılan ve dökülen veya ileri düzey ayrışmaya müsait olan taşlar belirlenmiş, ölçüleri alınarak, kalıpları çıkartılmış ve yeni kesme taşlar işlenerek yerlerine yerleştirilmiştir (Şekil 2, 3 ve 4).

Özellikle güneş, yağmur, don gibi atmosfer etkilerinin en fazla görüldüğü yer yapıların üst kısımlarıdır. Mevlevi (Türbe) Camisinin de duvar harpuştaları yenilenerek restorasyonu yapılmıştır (Şekil 5). Taş yüzeylerde taş değiştirmesini gerektirmeyen parça kopması, yüzeylerde aşınma ve oyuklanma gibi şu anda yapıya fazla zararı olmayan ancak ileriki dönemlerde potansiyel ayrışma gösterebilecek taşlar, bu kısımları kazınarak uygun harçlarla bütünleme işlemi yapılmıştır (Şekil 6). Taşlar arasındaki derzlerinde boşalmış olan kısımları kazınmış ve uygun harçlarla yeniden doldurulmuştur (Şekil 7).



Şekil 1. Mevlevi (Türbe) Camii planı [11] ve restorasyon sonrası görünümü. (Mevlevi (Turbe) plan and the view after restoration).



Şekil 2. Taşların kalıplara işlenmesinin görünümü. (Processing of stones from molds)



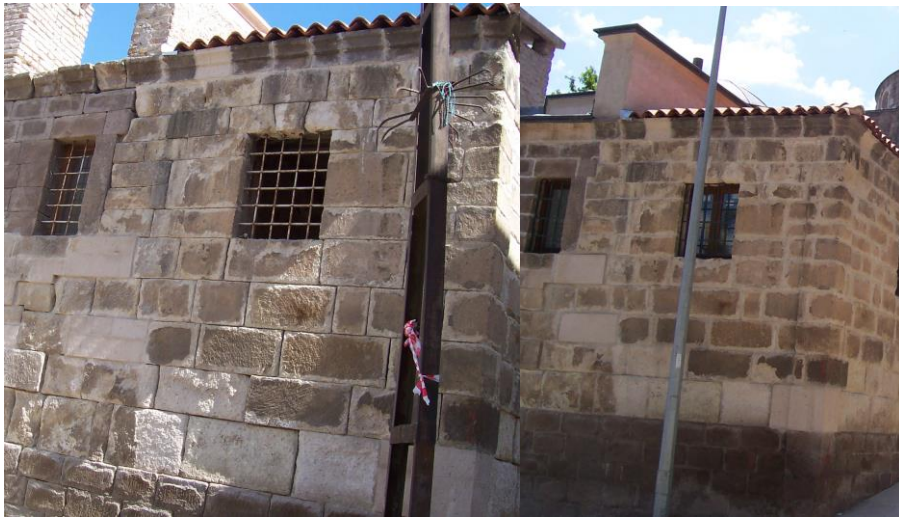
Şekil 3. Mevlevi (Türbe) Camii restorasyon çalışmasında bozmuş taşların yenilenmesinin görünümü. (Restoration of degraded stones in Mevlevi (Turbe) Mosque)



Şekil 4. Yenilenmiş taşların görünümü. (The view of restored stones)



Şekil 5. Mevlevi (Türbe) Cami restorasyonunda bozmuş harpuştaların yenilenmesinin görünümü (Restoration of capstones in Mevlevi (Turbe) Mosque).



Şekil 6. Mevlevi (Türbe) Cami restorasyon çalışmasında bütünleme işlemi. Taşların derzleri ve ayrılmış kısımları kazınmış ve bu kısımlar derz dolgu malzemesi ile doldurularak sağlamlaştırılmıştır. (Integration process of Mevlevi (Turbe) Mosque restoration which consists of removing joints and separated portions of stones and filling with grouting material).



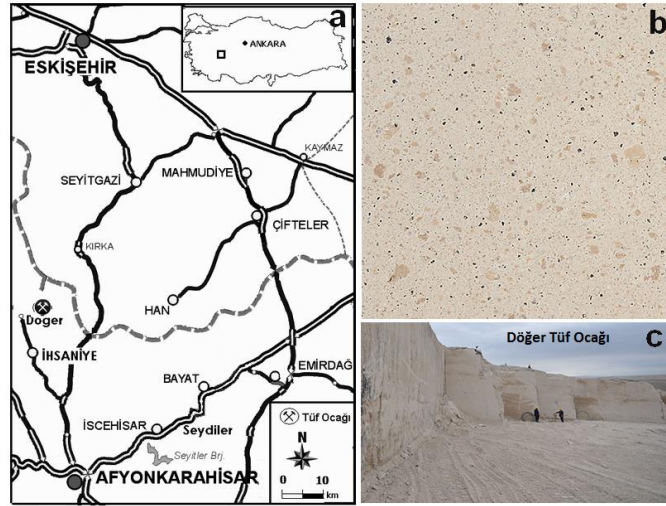
Şekil 7: Derz dolgusu ve bütünlemede kullanılan harçlar ve derz dolgularını görünümü. (The view of joint filler used in the grouting process)

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL and METHOD)

2.1. Materyal (Material)

Afyon bölgesinde bulunan Ayazini ve Döğler civarındaki tüfler günümüzde de inşaatlarda yapı taşı olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla bölgede çok sayıda taş ocağı

ve şist ardalanması şeklindedir. Bu birimlerin üzerine uyumsuz olarak Gebeciler Formasyonu gelmektedir. Bu birim konglomera, kumtaşı, aglomera, tüf, tüfit, marn, killi kireçtaşı, silisifiye kireçtaşından oluşmuştur. Orta Miyosen-Geç Miyosen sonlarına kadar şiddetli bir karasal volkanizm etkin olmuş ve birçok üyeden oluşan



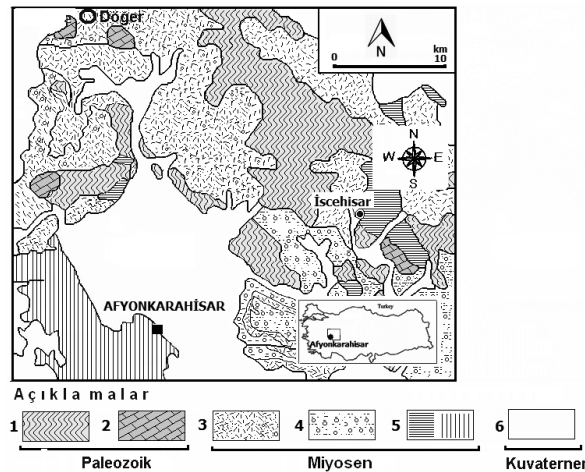
Şekil 8. Deneilerde kullanılan tüflerin lokasyon haritası (a). Tüflün yüzey görünümü (b) ve tüf ocağı (c) (Location map of the tuffs used in the experiments (a), surface appearance (b) and tuff quarry (c)).

işletilmektedir. Deneilerde Afyonkarahisar yöresinde yapıtaşı olarak kullanılan Döğler tüfleri kullanılmıştır. Bu tüf örneklerinin alındığı taş ocaklarının lokasyon haritası Şekil 8'da verilmiştir. Tüf ocağından ortalama 50x25x25 cm boylarında alınan bloklardan, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon Meslek Yüksekokulu Mermer Atölyesinde, deneyler için standartlarda öngörülen boyutlarda örnekler (70x70x70 mm) elde edilmiştir.

2.2. Döğler Bölgesi Jeolojisi (Geology of Döğler region)

Afyon civarında Paleozoyik yaşlı Afyon metamorfileri temeli oluşturur. Afyon Metamorfileri bölgede mermer

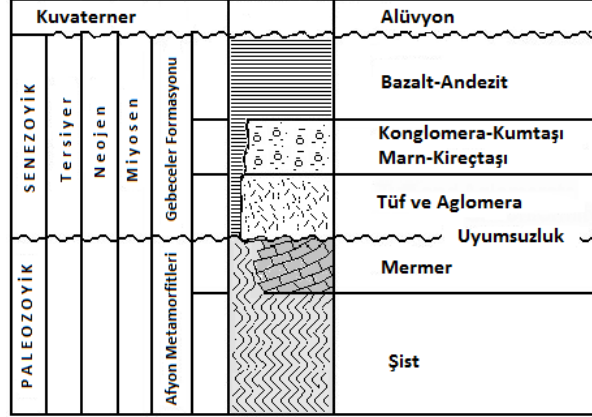
Afyon Volkanitlerini meydana getirmiştir. İç Batı Anadolu'da önemli bir yeri olan Afyon volkanitleri Bayat – İscehisar – Kırka – Sandıklı – Şuhut arasındaki bölgede çok geniş alanlar kaplamaktadır. Bunlardan Ayazini ve civarında yüzeylenen tüflerin alanı yaklaşık olarak 20 km² civarındadır. Tüfler, genellikle süt beyazı, krem renkli olup, çok kalın katmanlanma sunmaktadır. Çok geniş yayılımları olan tüfler kolay aşınabilen topoğrafyası ile dikkati çekerler. Döğler tüfleri olarak bilinen tüfler, Gebeceler formasyonu içerisinde yer almaktadır. En üstte ise Kuvaterner yaşlı yamaç molozu,



Şekil 9. Döğler bölgesi jeoloji haritası (Keller and Villari, 1972'den ve MTA 2009'dan düzenlenmiştir [12, 13]) 1 şist, 2 mermer (Afyon-metamorfileri), 3 tüf ve aglomera, 4 marn, kireçtaşı, kumtaşı ve konglomera (Gebeceler formasyonu), 5 bazalt, trakit ve 6 alüvyon. (Geological map of the Döğler region, modified from Keller and Villari, 1972 and MTA 2009) 1 schist, 2 marble (Afyon-metamorphites), 3 tuff and agglomerate, 4 marl, limestone, sandstone and conglomerate (Gebeceler formation), 5 basalt, trachyte and 6 alluvium

alüvyon ve travertenler yer almaktadır. Metamorfik temelin, Neojen yaşlı çökellerin ve volkanik kayaç malzemelerinin parçalanmasından oluşan alüvyon örtünün kalınlığı 50-150 m arasında değişmektedir [12]. Döğer civarının jeoloji haritası Şekil 9'da stratigrafik kesiti ise Şekil 10'da verilmiştir.

Vitrik bileşenler cam kıymıkları ve pomza parçaları şeklinde gözlenebilmektedir. Pomza parçaları süngerimsi dokuları ile karakteristik olup yer yer kil minerallerine dönüşmüşlerdir (Şekil 11).



Şekil 10 Döğer bölgesi stratigrafik kesiti (MTA 2009'dan düzenlenmiştir) [12]. (Stratigraphic sections of the Döğer region, modified from MTA 2009)

2.3. Yöntem (Method)

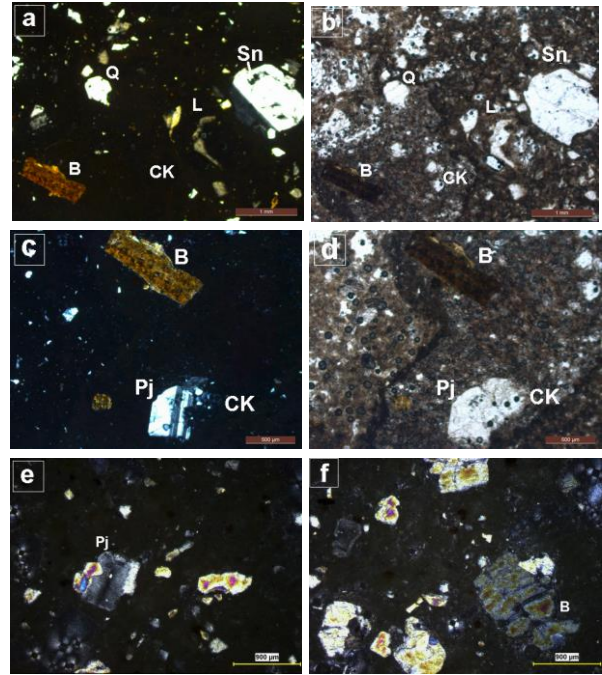
Deneylerde kullanılan tüflere kimyasal, mineralojik ve petrografik analizler ile fiziksel ve mekanik deneyler uygulanmıştır. Fiziksel ve mekanik deneyler TS EN standartlarına göre yapılmıştır. Tüflerin kimyasal analizi Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Doğaltaş Analiz Laboratuvarında Rigaku/ZSX Primus II marka XRF cihazı ile yapılmıştır. Numunelerin XRD analizleri A.K.Ü Teknoloji Uygulama Araştırma Merkezi (TUAM)'nde Shimadzu XRD-6000 model X-ışını difraktometre cihazı (Ni filtreli, CuK α radyasyonlu) kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca aynı örnekler yine aynı merkezde bulunan LEO 1430 VP model SEM cihazı ile mineralojik analizi yapılarak fotoğraflar çekilmiştir. Fiziksel ve mekanik deneylerde Afyon Kocatepe Üniversitesi Maden Mühendisliği Doğaltaş Analiz Laboratuvarında bulunan cihazlar kullanılmıştır. Petrografik analizler, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında, Euromex marka polarizan mikroskopta yapılmıştır.

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRMELER (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS)

3.1. Tüflerin Mineralojik ve Petrografik Özellikleri (Mineralogical and Petrographic Analysis)

3.1.1. Polarizan mikroskop incelemeleri (Polarizing optical microscope analyses)

Döğer tüfünün mineralojik bileşimini belirlemek için ince kesitleri üzerinde petrografik çalışmalar yapılmıştır ve tüfler genellikle kristal vitrik tüf olarak tanımlanmıştır. Bu incelemeye göre tüfler kristal bileşen olarak kuvars, feldispat (plajiyoklaz, çok az sanidin) ve biyotit, volkanik kökenli ve volkanik kökenli olmayan kayaç parçaları ve vitrik bileşenlerden oluşmaktadır.

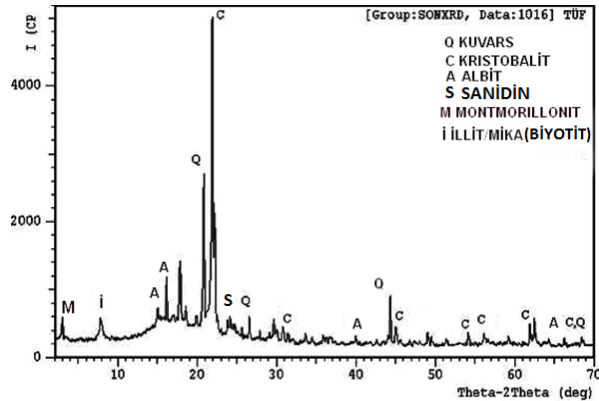


Şekil 11. Döğer tüfünün ince kesit görüntüsü (a, c, e ve f çift nikol; b ve d tek nikol). Kristal bileşen olarak Q: kuvars; Pj: plajiyoklaz; Sn: sanidin; B: biyotit; CK: cam parçaları; L: litik parçalar. Alkali feldispat olarak sanidin bulunmaktadır (a ve b). Plajiyoklazlarda albit ikizlenmesi görülürken, biyotit mineralleri de bozmuş olarak görülmektedir (e ve f). Microscopic views of Döğer tuff. (a, c, e and f cross nicol; b and d paralel nicol) (Q: quartz; Pj: plagioclase; Sn: sanidine; B: biotite; CK: pumice (vitric) fragments; L: lithic fragments)

(There are sanidine as alkali feldspar, albite twinned plagioclase can occasionally be seen in the thin sections of Döğer tuffs while biotite minerals are seen weathered (e and f)).

3.1.2. XRD analizi (XRD analyses)

Döğer tüflerinin XRD analiz sonuçları Şekil 12'de verilmiştir. XRD analizi sonucunda Döğer tüfü içerisinde kuvars, kristobalit, feldispat (albit), smektit ve illit/mika mineralleri bulunduğu tespit edilmiştir. Simektitin bulunması vitrik bileşenlerin ve feldispatların yer yer bozduğunu göstermektedir. XRD grafiğinde $2\theta=15^\circ$ den itibaren zeminin yükselmesi amorf malzeme (volkanik cam) varlığını göstermektedir.



Şekil 12. Döğer tüflerinin XRD analizi (XRD analyses of Döğer tuff)

3.1.3 SEM Analizi (SEM analyses)

Döğer tüf örneklerinde yapılan SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) analizinde feldispat (plajiyoklaz-albit), kuvars, biyotit ve kil oluşumları görülmektedir (Şekil 13). SEM analizinde feldispat grubu plajiyoklaz minerallerinin üzerinde illit mineralleri geliştiği gözlenmektedir.

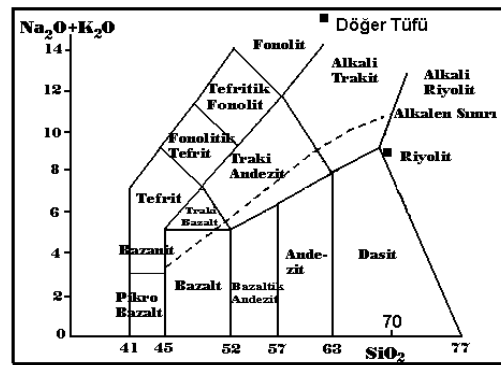
3.2. Tüflerin Kimyasal Analizleri (Chemical Analysis of Tuffs)

Döğer tüflerine ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir. Tüflerin en büyük bileşeni % 70.70 ile SiO_2 olup bunu % 14.10 ile Al_2O_3 izlemektedir. K_2O miktarı da % 6.7 oranındadır. Bu durum XRD analizinde tespit edilen kuvars, feldispat ve illit/mika minerallerinden kaynaklanmaktadır. Kimyasal analiz

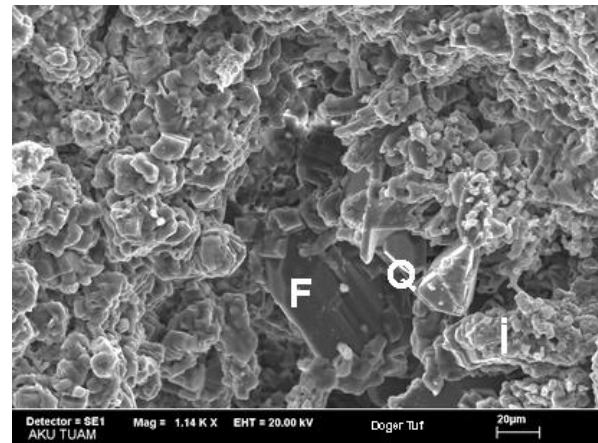
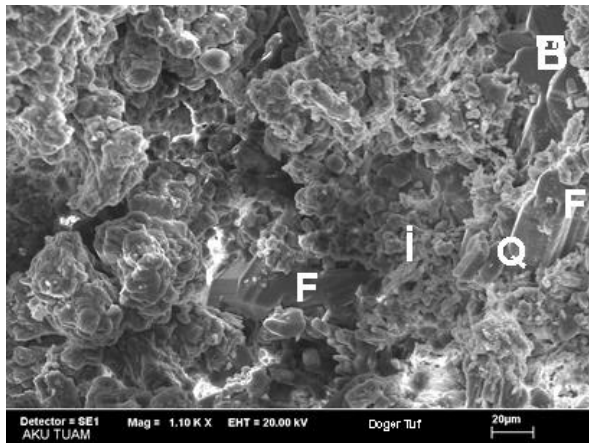
verilerine göre tüflerin bileşimini tespit etmek amacıyla Le Bas, vd. (1992) tarafından önerilen toplam alkali ve silis diyagramı kullanılmıştır. Döğer Tüflerinin kimyasal analiz sonuçları, Le Bas, vd. (1992) [14] tarafından önerilen toplam alkali içeriğine karşı silis diyagramı kullanılmıştır. Buna göre Döğer tüflerinin riyolitik bileşimli olduklarını belirlenmiştir (Şekil 14).

Çizelge 1. Döğer tüflerin kimyasal bileşimleri. (Chemical composition of the tuffs)

Kimyasal bileşim	(%)
SiO_2	70.70
Al_2O_3	14.10
Fe_2O_3	1.48
MgO	0.13
CaO	0.97
Na_2O	2.16
K_2O	6.70
TiO_2	0.04
A.Z	3.54
Toplam	99.69



Şekil 14. Döğer tüflerinin toplam alkali içeriğine karşı silis diyagramında sınıflandırılması (Le Bas, vd. (1992) [14]. Kesikli çizgi: Alkali-subalkali ayrımı Irvine ve Baragar (1971)'e göredir [15]. (Total alkali vs. silica classification diagram for the Döğer tuffs. Dashed line: alkaline-subalkaline division according to Irvine and Baragar (1971).



Şekil 13. Döğer tüflerinin SEM mikrofotoları. (F: feldispat (plajiyoklaz-albit), Q: kuvars, B: biyotit, İ: illit) (microphoto of Döğer tuff, F: feldspar (plagioclase -albite), Q: quartz, B: biotite, İ: illite)

3.3. Tüflerin Fiziko-mekanik Özellikleri (Physico-mechanical tests)

Döğer tüflerinin her birisinden 6 adet olmak üzere ilgili standartlarda öngörülen ebatlarda örnekler kullanılarak tüflerin fiziko-mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Fiziko mekanik testlerde kullanılan örnekler ve ilgili standartlar Çizelge 2’de verilmiştir. Deneylerde elde edilen verilerin minimum, maksimum ve ortalamaları Çizelge 3’de verilmiştir. Döğer tüflerinin fiziko-mekanik özelliklerinin incelenmesi ile aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

porozite içermektedir. Bu değer doğal yapı taşları için çok yüksek bir değerdir. Nitekim bunun bir sonucu olarak da su emme değeri ağırlıkça %22.49 iken hacimce %33.30 dur. Aynı şekilde tek eksenli basınç dayanımı 21.22 MPa olarak bulunmuştur. Döğer tüfünün ortalama tek eksenli basınç dayanımı değeri dikkate alındığında ISRM (1978) [16]’e göre çok zayıf kaya sınıfına girmektedir. Döğer tüflerinin don kaybı değerleri ortalama %1.46 olarak bulunmuştur. Tarihi yapılarda görülen ayrışmaların büyük bir kısmı, taşın mikro çatlak ve porozitelerine giren suların defalarca donma ve

Çizelge 2. Fiziko mekanik testlerde kullanılan örnekler ve ilgili standartlar. (Related standard for physico-mechanical tests TS EN: Technical Specification European Standard)

Testler	Boyut (mm)	Örnek Sayısı	İlgili standart
Birim Hacim Ağırlığı (kN m^{-3})	70x70x70	6	[17]
Yoğunluk	70x70x70	6	[17]
Ağırlıkça Su Emme (%)	70x70x70	6	[18]
Hacimce Su Emme (%)	70x70x70	6	[18]
Porozite (%)	70x70x70	6	[17]
Ultrasonik Dalga Hızı (km s^{-1})	70x70x70	6	[19]
Basınç Dayanımı (MPa)	70x70x70	6	[20]
Don Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	70x70x70	6	[21]
Eğilme Dayanımı (MPa)	300x50x50	6	[22]
Don Kaybı (%)	70x70x70	6	[21]

Çizelge 3. Döğer tüflerinin fiziko-mekanik özellikleri (Average physico-mechanical properties of tuffs rocks (Average of 6 samples in each experiment))

Test	Veriler		
	Min	Max	Ort.
Birim Hacim Ağırlığı (kN m^{-3})	1.40	1.50	1.45
Yoğunluk	2.43	2.49	2.45
Ağırlıkça Su Emme (%)	22.29	22.99	22.49
Hacimce Su Emme (%)	32.91	33.82	33.30
Porozite (%)	38.77	42.85	41.06
Ultrasonik Dalga Hızı (km s^{-1})	2.017	2.517	2.32
Basınç Dayanımı (MPa)	19.56	24.19	21.22
Don Sonrası Basınç Dayanımı (MPa)	15.99	22.78	18.73
Eğilme Dayanımı (MPa)	2.35	3.13	2.69
Aşınma dayanımı (Böhme) ($\text{cm}^3/50 \text{ cm}^2$)	19.65	24.35	21.42
Don Kaybı (%)	0.52	2.78	1.46

Porozite ve birim hacim ağırlığı, bir kayacın dayanımını etkileyen önemli özelliklerdendir. Döğer tüfünün % 41.06 toplam porozite yüzdesi ile yüksek poroziteye sahip olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak birim hacim ağırlığı diğer doğal taşlara göre düşük çıkmıştır. Porozite değerlerinin yüksek olması kayacın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Elde edilen veriler, Döğer riyolitik bileşimli tüflerinin petrografik özellikleri ile fiziko-mekanik özellikleri arasında dolaylı bir ilişkinin varlığını göstermektedir. Doğaltaşların ayrışma özelliğine en büyük etkisi olan su emme, dolayısıyla da porozite değeridir. Döğer tüfleri ortalama %41.06

çözünme etkileri ile oluşmaktadır. Don kaybı değerinin düşük olması taşların atmosfer etkilerine dayanıklı olduğunu göstermektedir. Bu durum, tarihi yapılarda kullanılan bu ve buna benzer tüflerin günümüze kadar bozulmadan veya az bozularak gelmesiyle izah edilebilir.

4. SONUÇLAR ve ÖNERİLER (RESULTS and SUGGESTIONS)

Günümüzde doğal taş standartları incelendiğinde; yakın geçmişe kadar TS 1910 [23] ve TS 2513 [24] doğal yapı taşları standardına göre değerlendirilmekteydi. Farklı

kayaç tipleri için gereksinimleri karşılayamayan bu standartlar kaldırılmış olup bunun yerine belli başlı bazı doğal taşların "Yapı ve Kaplama Taşı olarak kullanılan" başlıklı standartları kullanılmaktadır. Bu doğal taşlar: TS 6234 Granit [25], TS 11553 siyenit [26], TS 10934 gabro [27], TS 5762 diyabaz [28], TS 11135 trakit [29], TS 10835 andezit [30], TS 5961 serpantin [31] (magmatik taşlar), TS 10449 mermer [32] (metamorfik taşlar), TS 11137 kireçtaşı [33], TS 11444 dolomit [34], TS 11145 konglomera [35], TS 11143 traverten [36], TS 11443 oniks [37] (sedimanter taşlar) olarak sayılabilir. Listeden de görüleceği üzere tüfler için herhangi bir standart bulunmamaktadır. Ayrıca tüfler sahip olduğu yüksek porozite ve su emme, düşük özgül ağırlık ve dayanım özellikleri nedeniyle tüm bu standartların dışında kalmakta ve hiçbirine uymamaktadır.

Döğer riolitik bileşimli tüfü, kütlece ortalama don kaybı değerinin dışındaki deney sonuçlarının TS 2513 ve TS 1910 nolu iptal olan standartlarda öngörülen değerleri sağlamadığı görülmüştür. Ancak yapı veya kaplama taşı olarak kullanılacak olan bu taşların kullanım yerlerine göre ve kullanım yerinin gereksinimlerinin dikkate alınması durumunda rahatlıkla kullanılabilceği görülmektedir. Yoğunlukları düşük olduğundan hafif yapı taşı olarak kullanılması, işlenmesi ve taşınması kolaydır. Burada üretilen taşlar binaların (cami, vs) değişik yerlerinde, değişik amaçlarla uzun yıllardan beri kullanılmış ve kullanılmaya da devam edilmektedir. Geçmişten günümüze kadar ayakta kalmış tüfün kullanıldığı tarihi yapılar, tüfün doğal bir yapı taşı olarak değerlendirilebileceğinin ölçütü olmaktadır. Selçuklu ve Osmanlı döneminde yapılmış ve günümüze kadar gelmiş çok sayıda önemli cami, kervansaray, türbe, çeşme han, gibi kültürel tarihi yapılar da bunun en güzel örneğidir. Günümüzde de kesme taş olarak üretimi ve kullanımını olmasına karşın tüflere özgü bir standardın olmaması değerlendirme çalışmalarını güçleştirmektedir.

Lokal ölçekte yapı taşı olarak kullanılan bu doğal taşların kullanım yerlerinde uzun yıllar bozulmadan görevlerini yerine getirdikleri gözlenmiştir. Bu nedenle de Mevlevi (Türbe) Cami yapımında kullanılmış olan bu tüfler, restorasyon çalışmalarında da tercih edilmiştir. Buradan hareketle Döğer riolitik bileşimli tüfü değerlerinin karşılaştırıldığı doğal yapı taşları standartlarındaki sınır değerlerin revizyonunun bir an önce yapılmasının veya tüflere özgü ayrı bir standart hazırlama gerekliliği kendiliğinden ortaya çıkmaktadır. Çünkü ülkemizde üretilen ve yıllardır kullanılan doğal taşların büyük bir çoğunluğu bu standart verilerini sağlamamaktadır. Bu da birçok doğal taşın standartları sağlayamaması gibi sorunlar nedeni ile ekonomiye kazandırılmamasını ortaya çıkarmaktadır. Bu değişikliğin yapılması durumunda gözenekli ve hafif olmaları nedeni ile düşük direnç değerleri veren çok sayıda yapı taşı üzerindeki "kullanılmaz çekincesi" ortadan kalkacaktır.

İncelenen yapılarda bozulmanın en yoğun olduğu yer, suyla temasın daha kolay olduğu yerler ile zemine ve

çatıya yakın yerlerdir. Yapının bu yerlerinde su emme oranı yüksek taşların kullanılması hem bozunmaları hızlandırmakta hem de taşların görünüm özelliklerini kaybetmesine neden olmaktadır. Bu tür yapılarda kullanılan doğal taş yerine uygun olarak seçilmeli ve çok fazla yağmur kar suyu alan bölgelerde doğal taş üzerine koruma önlemleri alınmalıdır. Çok yağış alan bölgelerde su emme oranı düşük olan doğal taşlar tercih edilmelidir. Don olayının çok yaşandığı bölgelerde ise, su emmesi az, don dayanımı yüksek doğal taşlar kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Çelik, M.Y., "Dekoratif Doğal Yapı Taşlarının Kullanım Alanları ve Çeşitleri", *Madencilik Dergisi*, 42(1): 3-15, (2003).
2. Çelik, M.Y., ve Sel, H. "Afyondaki Tarihi Çeşmelerde Doğal Taş Kullanımı ve Restorasyonu", *Mersem 2008 Türkiye VI. Mermer Sempozyumu*. (Editör: M. Ersoy vd) Afyon, 39-58, (2008)
3. Schmid, R., "Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous rocks", *Geology*, 9, 41(3). ISSN 1432-1149 (1981).
4. Metin, S., Genç, Ş. ve Bulut, V., "Afyon ve Dolayının Jeolojisi", *MTA Rapor No: 8103*, Yayınlanmamış. (1987)
5. Kavas, T., ve Çelik, M.Y., "Ayazini (Afyon) Tüflerinin Çimento Sanayiinde Tras Olarak Kullanılabilirliğinin İncelenmesi", *Madencilik*, 40(2-3): 39-46, (2001)
6. Kuşçu, M. ve Yıldız, A. "Ayazini (Afyon) Tüflerinin Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması", *Türkiye III. Mermer Sempozyumu*, Afyon. 85-98, (2001).
7. Demir, İ., Başpınar, M.S. ve Görhan, G., "Afyonkarahisar-Ayazini Tüflerinin Mekanik Özellikleri ve Yapı Taşı Olarak Kullanılabilirliği", *MERSEM 2006 Türkiye V. Mermer ve Doğaltaş Sempozyumu*, 31-38, (2006).
8. Çelik, M.Y., Akbulut, H. ve Ergül A. "Water absorption process effect on strength of Ayazini tuff, such as the uniaxial compressive strength (UCS), flexural strength and freeze and thaw effect". *Environ Earth Sci*, 71: 4247-4259 (2014).
9. Çelik, M.Y., Ergül A. "The influence of the water saturation on the strength of volcanic tuffs used as building Stones". *Environ Earth Sci*, 74: 3223-3239, (2015).
10. Karazeybek, M., Polat, Z. ve Ilgar, Y., "Afyonkarahisar Vakıf Eserleri", *Afyon Kocatepe Üniversitesi Yayınları*, Yayın no: 60, Afyonkarahisar, 412 sf. (2005)
11. Ilgar, Y. "Afyonkarahisar Mevlîhânesi", *Türkiyat Araştırmaları Dergisi*, Konya. 2: 107-140, (1996).
12. MTA, "Afyon İli Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynakları", *MTA Orta Anadolu II. Bölge Müdürlüğü*, Konya. (2009)
13. Keller J, Villari L. "Rhyolitic ignimbrites in the region of Afyon (Central Anatolia)". *Bull Volcan*, 36: 342-358, (1972).
14. Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W. and Woolley, A.R., "The Construction of the Total Alkali-Silica Chemical Classification of Volcanic Rocks", *Miner Petrol*, 46: 1-22, (1992).
15. Irvine, T.N., and Baragar, W.R.A., "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8: 523-548, (1971).

16. ISRM (International Society for Rock Mechanics), "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 15(6): 319-368, (1978).
17. TS EN 1936, "Doğal Taşlar Deney Metotları, Gerçek Yoğunluk, Görünür Yoğunluk, Toplam ve Açık Gözeneklilik", (2010)
18. TS EN 13755, "Doğaltaşlar-Deney Metotları-Atmosfer Basıncında Su Emme Tayini", (2006)
19. TS EN 14579, "Doğal Taşlar- Deney Metotları- Ses İlerleme Hızı Tayini", (2006)
20. TS EN 1926, "Doğaltaşlar-Deney Metotları-Basınç Dayanımı Tayini", (2006)
21. TS EN 12371, "Doğal Taşlar- Deney Metotları- Dona Dayanım Tayin" (2003)
22. TS EN 12372, "Doğal Taşlar Deney Metotları, Tek Eksenli Yük Altında Eğilme Dayanım Tayini", (2007)
23. TS 2513 (Kaldırıldı), "Doğal Yapı Taşları", (1977)
24. TS 1910 (Kaldırıldı), "Kaplama Olarak Kullanılan Doğal Taşlar", (1977)
25. TS 6234, "Granit Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1988)
26. TS 11553, "Siyenit Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1995)
27. TS 10934, "Gabro Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan" (1993)
28. TS 5762, "Diyabaz Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan" (1988)
29. TS 11135, "Trakit Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1993)
30. TS 10835, "Andezit Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1993)
31. TS 5961, "Serpantin Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1988)
32. TS 10449, "Mermer Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1992)
33. TS 11137, "Kireçtaşı Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1993)
34. TS 11444, "Dolomit Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1994)
35. TS 11145, "Konglomera Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1993)
36. TS 11143, "Traverten Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1993)
37. TS 1144 "Oniks Mermeri Yapı ve Kaplama Taşı olarak Kullanılan", (1994)

Kayma Altında Katılaşılan Sıvıların Reolojik Özellikleri

Selim GÜRGEN*, Melih Cemal KUŞHAN**

*Ulaştırma Meslek Yüksekokulu, Anadolu Üniversitesi, 26470, Eskişehir, Türkiye

**Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 26480, Eskişehir, Türkiye

(Geliş / Received : 14.01.2016 ; Kabul / Accepted : 16.03.2016)

ÖZ

Bu çalışmada sıcaklık ve katı partikül miktarının Kayma Altında Katılaşılan Sıvıların (KAKS) reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KAKS'ların katılma mekanizmasını ifade edebilmek için viskozite profili, kritik kayma oranı, katılma periyodu ve katılma oranı olmak üzere dört temel parametre belirlenmiştir. KAKS'ın özelliklerini etkileyen diğer parametrelerin etkileri belirlenen bu dört parametre kullanılarak incelenmiştir. Deneylede silika esaslı KAKS'lar farklı silika miktarlarında ve sıcaklıklarda reolojik ölçümlere alınmıştır. Sonuçlara göre, katı partikül oranının artması katılma özelliğini iyileştiren bir etkiye sebep olmuştur. Sıcaklığın artması ise katılma mekanizmasını bozmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kayma altında katılaşılan sıvılar (KAKS), reoloji, silika

Rheological Properties of Shear Thickening Fluids

ABSTRACT

In this study, influences of temperature and amount of solid particles in Shear Thickening Fluids (STFs) were investigated. To observe the thickening mechanism of STFs, four main characteristic terms which are viscosity profile, critical shear rate, thickening period and thickening ratio, were defined and the effects of the variable parameters on these terms were discussed. In the experimental stage, rheological measurements were performed with silica based STFs with various silica amounts under various temperatures. According to the results, thickening behavior was improved as the solid particles were increased in the STFs. However, thickening mechanism decayed by the effect of increased temperature.

Keywords: Shear thickening fluid (STF), rheology, silica

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kayma altında katılaşılan sıvılar (KAKS) Newtonyan olmayan bir sıvı çeşididir. Bu sıvıların üzerine gerilim uygulandığı sürece sıvı viskozitesini artırır. Ortamdan gerilim çekildiğinde ise viskozite ilk değerine geri döner. KAKS'lar genellikle bir sıvı ortamda dağıtılmış nano boyutlu katı partiküllerden oluşan süspansiyonlardır. KAKS'ların katılma mekanizması ile ilgili ilk çalışma Hoffman tarafından gerçekleştirilmiştir. Hoffmann bu çalışmada kritik kayma gerilmesi olarak adlandırılan nokta öncesinde süspansiyon içindeki katı partiküllerin altıgen biçimli paketler halinde olduğunu belirtmiştir. Bu nokta ötesinde ise partikül düzeninin bozulup düzensiz partikül kümelenmelerinin oluştuğunu bildirmiştir [1]. Bu fikir Düzen-Düzensizlik Geçişi (Order-Disorder Transition) teorisinin temelini oluşturmaktadır. Hidrokümelenme (Hydroclustering) teorisi ise katılma mekanizmasının hidrokümel (hydroclusters) arasında oluşan güçlü hidrodinamik kuvvetler sonucu oluştuğunu önermektedir. Buna göre, yüksek gerilmeler altında süspansiyon içinde güçlü hidrodinamik kuvvetler oluşur ve dolayısıyla partiküller birbiriyle temas haline geçer. Sonuç olarak süspansiyonda hidroküme olarak adlandırılan ve çok sayıda partikülün kümeleşmesi sonucu oluşan yapılar meydana gelir. Hidrokümel

yoğun haldedir ve akış içinde bir dizi engel olarak sıvı akışını zorlaştırır. Sıvı üzerinden gerilme kalktığında ise partiküller dağınık düzene geçerek süspansiyon viskozitesini düşürür. Hidrokümelenme teorisi birçok çalışmayla doğrulanmış ve KAKS yapısını açıklamada genel kabul görmektedir [2,3]. KAKS'ların bu özelliğini mühendislik alanında kullanabilmek için bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu sıvılar personel zırh sistemleri, enerji sönmüleyiciler ve akıllı yapılar olmak üzere genel olarak üç alanda kullanılmışlardır. Birçok önceki çalışma [4-9] bu süspansiyonları zırh sistemleri ile bir araya getirerek kompozit zırh malzemeleri geliştirmiştir. Çalışmalarda KAKS ilavesinin zırhların koruyuculuk performansını arttırdığı bildirilmiştir. Bu süspansiyonlar ayrıca enerji sönmüleyici sistemlerde titreşim kontrolü için de kullanılmıştır. Gerilim uygulandıkça viskozitenin artışı sönmülemeye yardımcı bir özellik olarak görülmüştür. Zhang ve ekibi [10] KAKS ile doldurulmuş bir sönmüleyici elemanın dinamik performansını inceleyerek enerji sönmülemeye KAKS'ın etkili olduğunu bildirmiştir. Fischer ve ekibi [11] KAKS ilave edilmiş bir makine elemanının titreşim karakteristiğini inceleyerek titreşimin KAKS sayesinde kontrol edilebileceğini göstermiştir. Bunların yanı sıra, endüstriyel makinaların çalışma sırasında titreşimini sönmülemek için KAKS içeren sabitleyiciler düşünülmüştür. Akıllı yapılarda ise KAKS, değişik şekillerde kullanılmıştır. William ve ekibi [12] KAKS içerikli medikal araçlar ile diz, dirsek, omuz gibi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: selingurgen@anadolu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 409-414

eklemlerin ani hızlanmasını engelleyerek ani yükler altında eklemlerin zarar görmesini önlemiştir. Ayrıca bazı araştırmacılar manyeto-reolojik (MR) sıvılar ile KAKS'ları bir araya getirerek kompozit malzemeler oluşturmuşlardır. Elde edilen yeni sıvının hem MR hem de KAKS özelliklerine sahip olduğu fakat MR sıvılara daha yakın davranış sergilediği bildirilmiştir [13–16].

Bu çalışmada sıcaklık ve süspansiyon içindeki katı partikül miktarının KAKS'ların reolojik özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. KAKS'ların katılaşma mekanizmasını ifade edebilmek için dört temel terim tanımlanmış ve değişken parametrelerin etkileri bu terimler kullanılarak incelenmiştir. KAKS yapısını gösteren bu terimler; viskozite profili, kritik kayma oranı, katılaşma periyodu ve katılaşma oranı olarak belirlenmiştir. Deneylerde silika esaslı KAKS'lar farklı silika miktarlarında ve sıcaklıklarda reolojik ölçümlere alınmıştır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHOD)

Çalışmada katı partikül olarak silika tozu (Aerosil 90, Evonik), sıvı ortam olarak ise polietilen glikol (81172, Sigma-Aldrich) seçilmiştir. Üretici firma bilgilerine göre silika ve polietilen glikol'ün teknik detayları sırasıyla Çizelge 1 ve Çizelge 2'de verilmektedir. Reolojik ölçümler için dört farklı silika miktarı ağırlıkça %5, %10, %15 ve %20 olarak belirlenmiştir. Numunelerin hazırlanması aşamasında silika tozları polietilen glikol (PEG) ortamında dağıtılıp 40 dakika boyunca mekanik olarak karıştırılmıştır. Numunelerde sedimentasyonu önlemek için silika tozu karıştırma sırasında aralıklarla eklenerek homojen bir şekilde dağıtılması sağlanmıştır. Her numune toplamda 10 g olarak hazırlanmıştır. Şekil 1

KAKS hazırlama prosedürünü ve örnek bir numuneyi göstermektedir.

Çizelge 1. Silika özellikleri (Properties of silica)

Yüzey alanı	75-110 m ² /g
Ortalama tane boyutu	20 nm
Sıkıştırılmış yoğunluk	80 g/l
Saflık	> %99.8

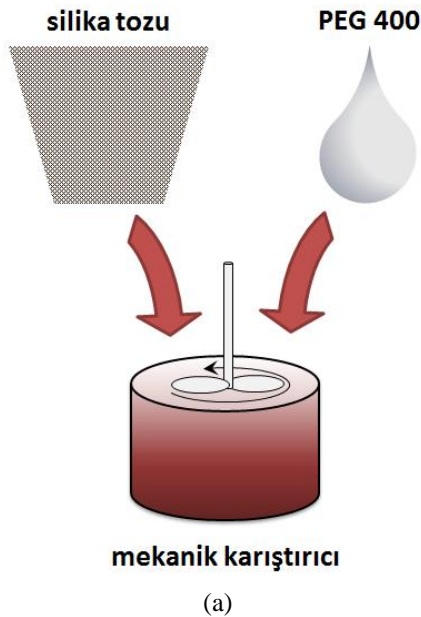
Çizelge 2. Polietilen glikol özellikleri (Properties of polyethylene glycol)

Moleküler ağırlık	400 g/mol
Yoğunluk	1.13 g/cm ³
Tutuşma sıcaklığı	305°C

Reolojik ölçümler gerilim kontrollü reometre (MCR 301, Anton Paar) ile yapılmıştır. Testler sırasında 20 mm çaplı paralel plaka kullanılmıştır. Ölçüm boşluğu 0.20 mm olarak sabit tutulmuştur. Ölçümlerde kayma oranı 0–1000 s⁻¹ aralığında kullanılmıştır. Test sıcaklığı için üç farklı seviye sıcaklık 20°C, 40°C ve 60°C olarak belirlenmiştir. Sıcaklığın etkisi %20 silika miktarlı KAKS'lar üzerinde incelenmiştir. Süspansiyon sıcaklığı reometrenin alt plakasına bağlı olan bir ısıtıcı sistemle kontrol edilmiştir.

3. SONUÇLAR (RESULTS)

KAKS'lardaki katılaşma davranışı birçok parametreye bağlı olarak gerçekleşir. Katı partikül boyutu, katı partikül en/boy oranı, katı partikül cinsi, katı partikül miktarı, sıvı ortam moleküler ağırlığı, sıcaklık gibi her etken katılaşma mekanizması üzerinde bir etkiye sahiptir. Ancak katılaşmanın gerçekleşebilmesi için gereken mekanizma hidrodinamik kuvvetlerin partiküller arası itici kuvvetleri yenmesi ve süspansiyon içinde



Şekil 1. (a) KAKS numune hazırlama prosedürü ve (b) KAKS numunesi ((a) Procedure of STF preparation and (b) STF sample)

hidrokümeleri oluşturmaya bağlıdır. Durağan veya düşük akış hallerinde süspansiyon içindeki katı partiküller elektrostatik kuvvetler gibi etkiler ile birbirlerine itici kuvvetler uygular ve partiküller sıvı ortamda rastgele dağınık durumda bulunurlar. Ancak süspansiyondaki kayma oranı arttıkça hidrodinamik kuvvetler yükselerek katı partikülleri birbirine yaklaştırır ve hidrokümeleri oluşturup akış içinde viskoziteyi arttıran engeller yaratırlar [3,9].

Hidrokümelenme teorisine göre katılaşıma mekanizması hidrodinamik kuvvetlerin Brownian kuvvetlere oranı olan Peclet sayısı (Pe) ile ilişkilendirilmektedir (Denklem 1).

$$Pe = \frac{\dot{\gamma}a^2}{D} \quad (1)$$

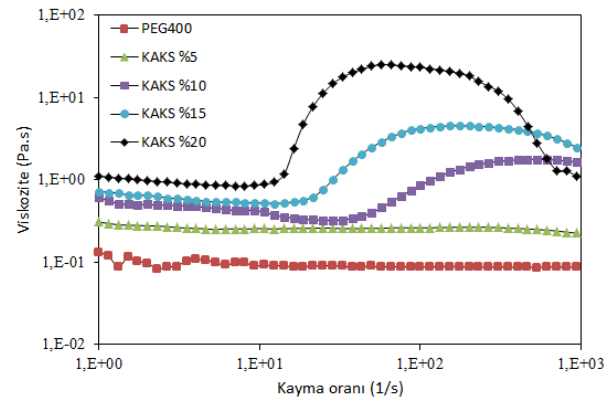
$\dot{\gamma}$ kayma oranını, a partikül yarıçapını ve D difüzyon katsayısını ifade etmektedir. Difüzyon katsayısı D ise Stokes-Einstein eşitliğinde verilmektedir (Denklem 2).

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta a} \quad (2)$$

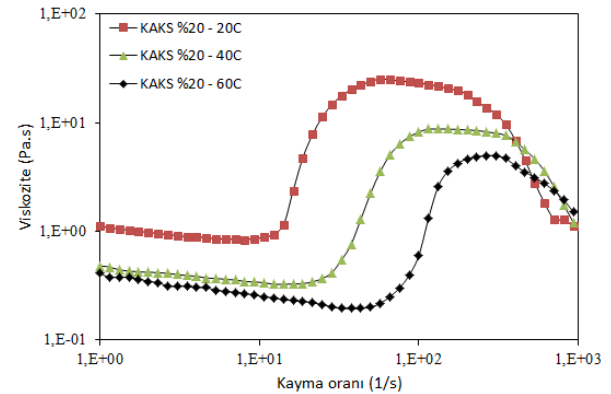
η sıvı ortam dinamik viskozitesini, k Boltzmann sabitini ve T sıcaklığı ifade etmektedir. Kayma oranının artması partiküller arası mesafenin azalmasına sebep olmaktadır. Dolayısıyla hidrodinamik kuvvetler baskın hale gelip partiküller üzerine uygulanan net kuvvet partikülleri birbirine yaklaştırmaktadır [20]. Peclet sayısı süspansiyon reolojisi hakkında bilgi vermektedir. $Pe \approx 1$ olduğu durumlarda kayma altında incelleme görüldüğü bilinmektedir. Peclet sayısının daha yüksek değerler aldığı durumlarda ise katılaşıma mekanizması gerçekleşmektedir [20–22].

Şekil 2 farklı silika miktarlarına sahip süspansiyonların 20°C'deki reolojik özelliklerini göstermektedir. Grafikte görüldüğü üzere bu çalışmadaki malzemelerle hazırlanan süspansiyonlar için katılaşıma özelliği %5–%10 silika miktarları arasında gerçekleşmektedir. Silika miktarındaki artış katılaşıma olmasa dahi süspansiyonun viskozite profilini arttırmaktadır. Viskozite profilindeki bu artış birim süspansiyon hacmindeki silika partikül sayısındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Silika miktarı arttıkça partiküller arası mesafe azalmakta ve süspansiyon daha yoğun bir hal almaktadır [17,18]. Katı partikül oranındaki artıştan dolayı viskozite profilinin artışı önceki çalışmalarda [15–18] da belirtilmiştir. Şekil 3 farklı sıcaklıklardaki %20 silika miktarlı KAKS'ların reolojik özelliklerini göstermektedir. Buna göre, sıcaklığın artması süspansiyon viskozite profilini düşürmektedir. Bu etki sıcaklık yükseldikçe silika ve PEG arasındaki hidrojen bağlarının zayıflamasından kaynaklanmaktadır. Süspansiyon içinde silika ve PEG molekülleri birbirleri arasında güçlü hidrojen bağları kurmaktadır. Sıcaklık yükseldikçe hidrojen bağları zayıflayarak PEG moleküllerinin hareketliliği artar. Bunun sonucu olarak silika partiküllerini saran hidrojen bağı tabakası gittikçe incelik ve kaybolur. Dolayısıyla silika partikülleri daha serbest kalarak Brownian hareketleri artar ve partiküller arası çekim bozulur viskozitenin düşmesine sebep olur. Ayrıca düşük kayma oranlarında süspansiyon mikroyapısı bozulmaya başlar

ve silika partiküllerinin Brownian hareketlerinde artış gözlenir. Bu durum süspansiyon viskozitesinin azalmasına yani kayma altında incelleme olayına sebep olur. Ancak kayma oranı arttıkça hidrodinamik kuvvetler süspansiyon içinde daha baskın görülür. Kritik kayma oranı denilen noktaya erişildiğinde ise hidrodinamik kuvvetler silika partiküllerinin kümeleşmesini sağlayacak seviyeye yükselir. Böylece silika partiküllerinin Brownian hareketleri azalır ve sonuç olarak süspansiyon içinde oluşan hidrokümeler sıvı akışını engelleyen bariyerler olarak viskozitenin artmasına sebep olur [18]. Katılaşıma mekanizması ayrıca süspansiyonun sıvı ortamına da bağlıdır. Sıvı ortamın molekül ağırlığı arttıkça daha uzun moleküler bağlar görülmektedir. Bu da süspansiyon içinde moleküller arası hareketi kısıtlamakta ve süspansiyon viskozite profilini yükseltmektedir. Bunun yanı sıra, uzun moleküler bağlar silika partiküllerinin sıvı ortama bağlanma oranını arttırmakta ve silika partiküllerini daha yakın alanda tutarak katılaşıma için gereken hidrokümelerin oluşmasını daha düşük kayma oranlarında gerçekleştirmektedir [9,18].



Şekil 2. Farklı silika miktarlarına sahip süspansiyonların reolojik özellikleri (Rheological properties of STFs with various silica contents)



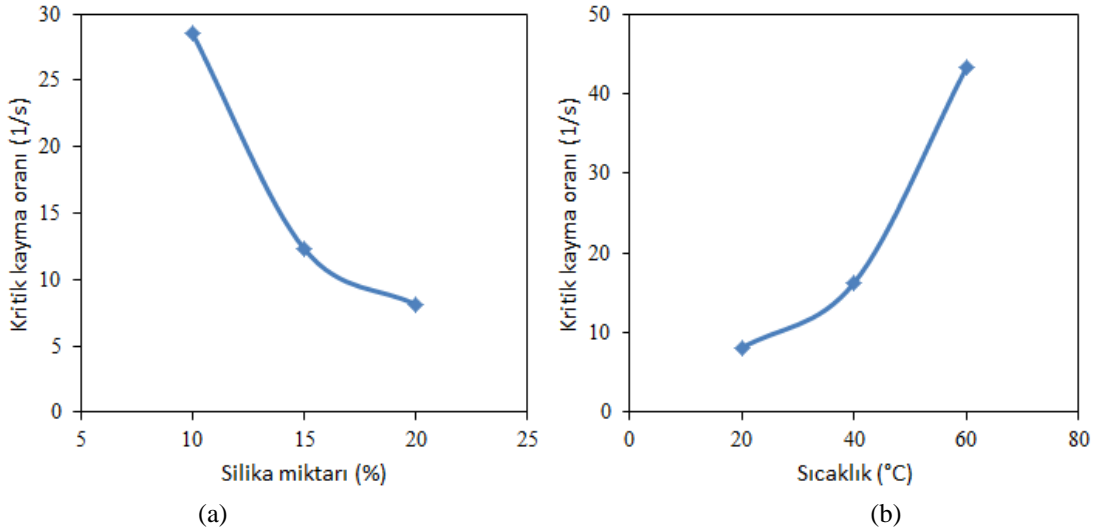
Şekil 3. Farklı sıcaklıklar altında süspansiyonların reolojik özellikleri (Rheological properties of STFs under various temperatures)

KAKS'lar için önemli bir özellik katılaşımanın başladığı nokta olarak tanımlanan kritik kayma oranıdır. Bu değer

katılaşmanın başladığı andaki kayma oranıdır. Şekil 4 kritik kayma oranının silika miktarı ve sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Şekil 4a'daki değerler 20°C'deki KAKS'ların test sonucudur. Şekil 4b'deki sonuçlar ise %20 silika miktarlı KAKS'lar ile elde edilmiştir. Buna göre, kritik kayma oranının silika miktarıyla düştüğü görülmektedir. Yani silika miktarı arttıkça katılaşma daha düşük kayma oranlarında gerçekleşebilmektedir. Süspansiyonda katı partikül

yenerek hidrokümler oluşturması gerekmektedir. Partiküller arası itici kuvvetler sıcaklığın yükselmesi ile artmaktadır ve bu itici kuvvetleri aşması gereken hidrodinamik kuvvetlerin artması gerekmektedir. Hidrodinamik kuvvetler yüksek kayma oranlarında arttığı için sıcaklık yükseldikçe katılaşmanın tetiklendiği kritik kayma oranı yükselmektedir [7,18,19]

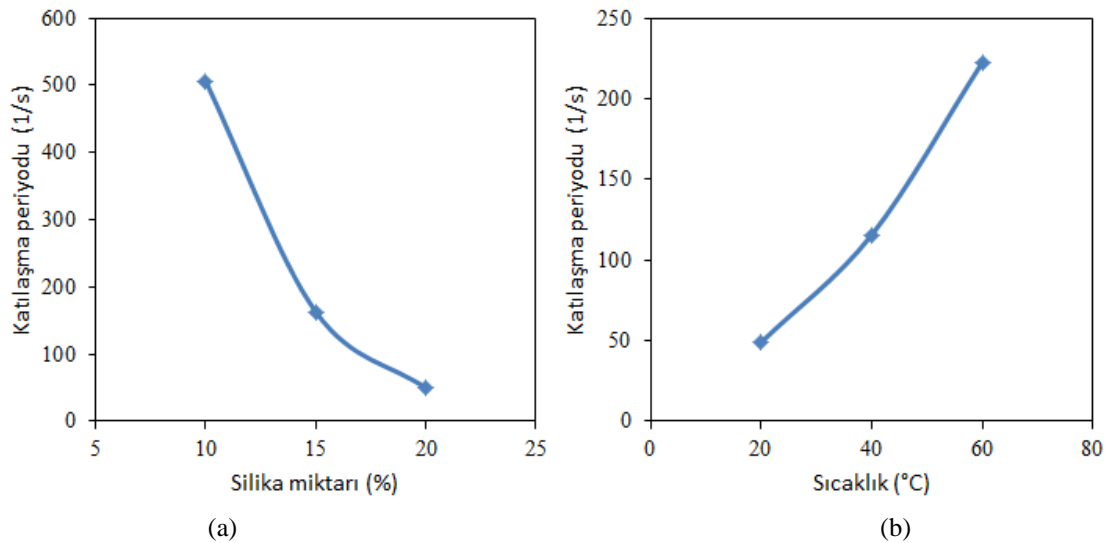
KAKS'ların katılaşma davranışlarını gösteren bir başka özellik ise katılaşma periyodudur. Katılaşma periyodu



Şekil 4. Kritik kayma oranının (a) silika miktarı ve (b) sıcaklıkla değişimi (Variation of critical shear rate with respect to (a) silica content and (b) temperature)

miktarı arttıkça partiküller arası itici kuvvetler azalmakta ve hidrokümleri oluşturmak için gereken kayma oranı daha düşük değerlerde yeterli olmaktadır [7]. Dolayısıyla süspansiyondaki silika miktarı arttıkça süspansiyonun katılaşma özelliği iyileşmektedir. Sıcaklık ise kritik kayma oranını yükselten bir etkiye sahiptir. Süspansiyonda katılaşmanın gerçekleşebilmesi için hidrodinamik kuvvetlerin partiküller arası itici kuvvetleri

süspansiyonda maksimum viskozite değerinin elde edildiği kayma oranı ile kritik kayma oranı arasındaki fark olarak tanımlanmaktadır. Bu değer katılaşmanın ne kadar hızlı gerçekleştiğini göstermektedir. Dolayısıyla katılaşma periyodunun kısa olması süspansiyonun katılaşma tepkisinin hızlı olduğu yani katılaşma özelliğinin yüksek olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 5 katılaşma periyodunun silika miktarı ve sıcaklıkla

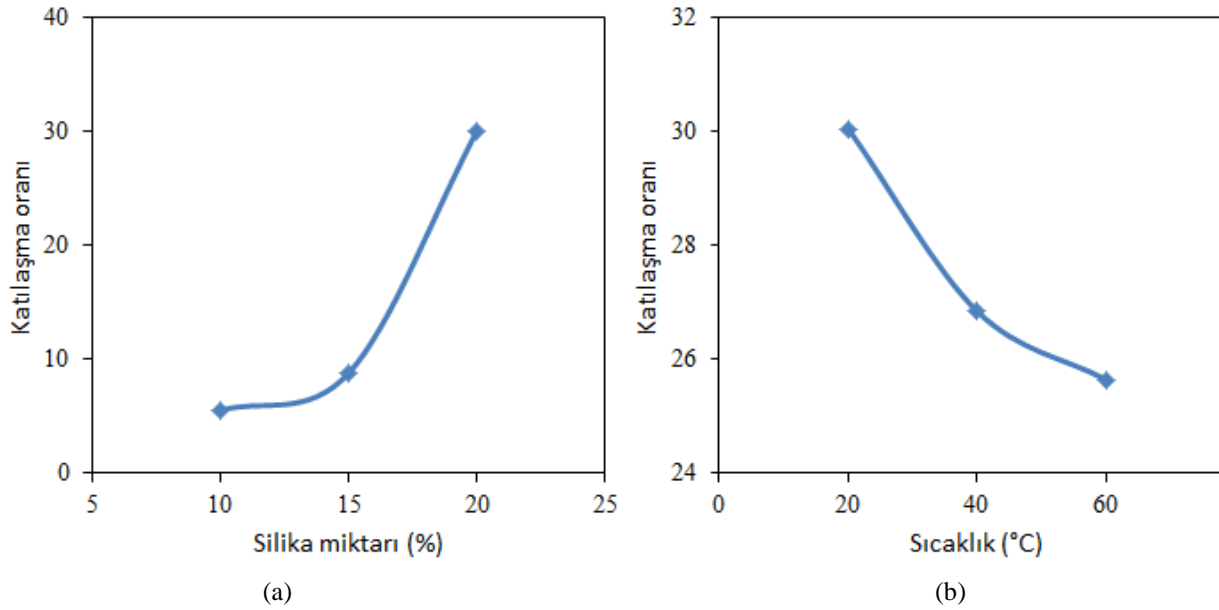


Şekil 5. Katılaşma periyodunun (a) silika miktarı ve (b) sıcaklıkla değişimi (Variation of thickening period with respect to (a) silica content and (b) temperature)

değişimini göstermektedir. Buna göre, katılaşma periyodu silika miktarı ile azalmaktadır. Bu durum silika miktarındaki artışın katılaşma mekanizmasını hızlandırdığını göstermektedir. Sıcaklığın artması ise katılaşma periyodunu uzatmakta yani katılaşma özelliğini bozmaya yönelik bir etki yapmaktadır. Bu durum katılaşmanın tamamlanması için gereken hidrodinamik kuvvetlerin yüksek kayma oranına ihtiyaç duymasına ve sonuç olarak katılaşma periyodunun gecikmesinden kaynaklanmaktadır.

Katılaşma oranı KAKS'ların katılaşma mekanizması hakkında fikir veren önemli bir parametredir. Katılaşma oranı, süspansiyonun reolojik eğrisindeki katılaşma sonrası ulaşılan maksimum viskozitenin kritik kayma oranındaki viskoziteye oranı olarak ifade edilmektedir. Buna göre, katılaşma oranı ne kadar yüksekse süspansiyonun katılaşma davranışı o kadar gelişmiş olarak yorumlanmaktadır. Şekil 6 katılaşma oranının silika miktarı ve sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Grafiklerde görüldüğü üzere silika miktarı arttıkça süspansiyonun katılaşma oranı da artmaktadır. Bu durum

Sonuçlara göre katı partikül miktarının artması genel olarak süspansiyonun katılaşma davranışını olumlu yönde etkilemektedir. Bu durum silika miktarındaki artışın kritik kayma oranını düşürüp daha erken aşamada katılaşmayı tetiklemesiyle görülmektedir. Ayrıca silika miktarı arttıkça katılaşma periyodu kısalmakta yani süspansiyon katılaşmanın tamamlanması için çok daha kısa sürede tepki vermektedir. Katılaşma davranışını en iyi ifade eden parametrelerden biri olan katılaşma oranı da silika miktarındaki artış ile artmaktadır. Silika miktarındaki artış ile süspansiyon viskozite profilinin artması ise sıvılarda genel olarak görülen yoğun katı faz sebebiyledir. Diğer yandan sıcaklık ise KAKS'lar üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Sıcaklığın katılaşma mekanizmasını bozması temel olarak partiküller arası itici kuvvetlerin sıcaklıkla birlikte artmasına dolayısıyla katılaşma mekanizmasını oluşturan hidroküme oluşumunun yavaşlamasına dayanmaktadır. Sıcaklığın yükselmesiyle görülen bu etki kritik kayma oranını geciktirmekte, katılaşmanın tamamlanması için geçen periyodu uzatmakta ve katılaşma oranını da



Şekil 6. Katılaşma oranının (a) silika miktarı ve (b) sıcaklıkla değişimi (Variation of thickening rate with respect to (a) silica content and (b) temperature)

süspansiyon içindeki katı partikül yoğunluğunun katılaşma özelliğini olumlu olarak etkilediğini göstermektedir. Sıcaklık ise katılaşma oranı üzerinde ters bir etkiye sahiptir. Yani sıcaklık yükseldikçe katılaşma oranı azalmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda partiküller arası itici kuvvetlerin baskın olmasından dolayı hidrodinamik kuvvetlere düşük sıcaklıklarda olduğundan daha fazla karşı koymasından kaynaklanmaktadır.

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Deneysel verilerin incelenmesinde KAKS'larla ilgili dört temel çıktı incelenmiştir. Değişken parametrelerin çıktıları arttıran etkileri Çizelge 3'de verilmektedir.

düşürmektedir. Bunların yanı sıra sıcaklığın artması ile süspansiyon incelmeyle dolayısıyla viskozite profili düşmektedir.

Çizelge 3. KAKS katılaşma mekanizması üzerinde değişken parametre etkileri (Effects of variable parameters on STF thickening mechanism)

Çıktılar	Değişken parametreler	
	Katı partikül miktarı	Sıcaklık
Viskozite profili	(+)	(-)
Kritik kayma oranı	(-)	(+)
Katılaşma periyodu	(-)	(+)
Katılaşma oranı	(+)	(-)

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada Newtonyan olmayan ve reolojik olarak özel bir karaktere sahip olan silika esaslı KAKS'ların katılaşma mekanizması incelenmiştir. KAKS'ların katı partikül miktarına ve sıcaklığa bağlı reolojik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Son yıllarda bu özel malzemelerin mühendislik uygulamalarında yer aldığı görülmektedir. Reolojik özelliklerinden yararlanıldığından dolayı bu sıvıların hangi şartlarda ne tür tepki verdiği tespit edilerek kullanılması mümkün olan alanlar belirlenebilir. Kritik kayma oranı ve katılaşma oranı gibi parametrelerin belirlenmesi ile kontrol edilebilir sıvı aktüatörler gibi uygulamalar gerçekleştirilebilir. Ayrıca sıcaklık girdisi ile reolojik davranışları kontrol edilerek titreşim sönmüleyici sistemlere adapte edilmesi de mümkün olabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu tarafından desteklenen ESOGU-2014-431 no'lu proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca yazar S.Gürgen 2211 Programı kapsamında desteklerinden dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hoffman R. L., "Discontinuous and Dilatant Viscosity Behavior in Concentrated Suspensions. I. Observation of a Flow Instability," *J. Rheol.*, 16(1): 155, (1972).
- Boersma W. H., Laven J., and Stein H. N., "Viscoelastic properties of concentrated shear-thickening dispersions," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 149(1): 10–22, (1992).
- Bossis G. and Brady J. F., "The rheology of Brownian suspensions," *J. Chem. Phys.*, 91(3): 1866, (1989).
- Park J. L., Yoon B. I., Paik J. G., and Kang T. J., "Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part I - Effect of laminating sequence," *Text. Res. J.*, 82(6): 527–541, (2012).
- Park J. L., Yoon B. I., Paik J. G., and Kang T. J., "Ballistic performance of p-aramid fabrics impregnated with shear thickening fluid; Part II - Effect of fabric count and shot location," *Text. Res. J.*, 82(6): 542–557, (2012).
- Srivastava A., Majumdar A., and Butola B. S., "Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid," *Mater. Sci. Eng. A*, 529: 224–229, (2011).
- Kang T. J., Kim C. Y., and Hong K. H., "Rheological behavior of concentrated silica suspension and its application to soft armor," *J. Appl. Polym. Sci.*, 124(2): 1534–1541, (2012).
- Lee Y. S., Wetzel E. D., and Wagner N. J., "The ballistic impact characteristics of Kevlar® woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid," *Journal of Materials Science*, 38(13): 2825–2833, (2003).
- Baharvandi H. R., Alebooyeh M., Alizadeh M., Heydari M. S., N Kordani., and Khaksari P., "The influences of particle-particle interaction and viscosity of carrier fluid on characteristics of silica and calcium carbonate suspensions-coated Twaron® composite," *J. Exp. Nanosci.*, 1–14, (2015).
- Zhang X. Z., Li W. H., and Gong X. L., "The rheology of shear thickening fluid (STF) and the dynamic performance of an STF-filled damper," *Smart Mater. Struct.*, 17(3): 035027, (2008).
- Fischer C., Braun S. A., Bourban P.-E., Michaud V., Plummer C. J. G., and Manson J.-A. E., "Dynamic properties of sandwich structures with integrated shear-thickening fluids," *Smart Mater. Struct.*, 15(5): 1467–1475, (2006).
- Williams T. H., Day J., and Simon P., "Surgical and Medical Garments and Materials Incorporating Shear Thickening Fluids," US2007000440086, (2008).
- Peng G. R., Li W., Tian T. F., Ding J., and Nakano M., "Experimental and modeling study of viscoelastic behaviors of magneto-rheological shear thickening fluids," *Korea-Aust. Rheol. J.*, 26(2): 149–158, (2014).
- Li W., Nakano M., Tian T., Totsuka A., and Sato C., "Viscoelastic properties of MR shear thickening fluids," *J. Fluid Sci. Technol.*, 9(2): 10019, (2014).
- Zhang X., Li W., and Gong X. L., "Thixotropy of MR shear-thickening fluids," *Smart Mater. Struct.*, vol. 19(12): 125012, (2010).
- Zhang X., Li W., and Gong X. L., "Study on magnetorheological shear thickening fluid," *Smart Mater. Struct.*, 17(1): 015051, (2008).
- Liu D. M., "Particle packing and rheological property of highly-concentrated ceramic suspensions: ϕ_m determination and viscosity prediction," *Journal of Materials Science*, 35(21): 5503–5507, (2000).
- Liu X.-Q., Bao R.-Y., Wu X.-J., Yang W., Xie B.-H., and Yang M.-B., "Temperature induced gelation transition of a fumed silica/PEG shear thickening fluid," *RSC Adv*, 5(24): 18367–18374, (2015).
- Suh Y. J., Ullmann M., Friedlander S. K., and Park K. Y., "Elastic Behavior of Nanoparticle Chain Aggregates (NCA): Effects of Substrate on NCA Stretching and First Observations by a High-Speed Camera †," *J. Phys. Chem. B*, 105(47): 11796–11799, (2001).
- Hasanzadeh M. and Mottaghitlab V., "The Role of Shear-Thickening Fluids (STFs) in Ballistic and Stab-Resistance Improvement of Flexible Armor," *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(4): 1182–1196, (2014).
- Wagner N. J. and Brady J. F., "Shear thickening in colloidal dispersions," *Physics Today*, 62(10): 27–32, (2009).
- Warren J., Offenberger S., Toghiani H., Pittman C. U., Lacy T. E., and Kundu S., "Effect of Temperature on the Shear-Thickening Behavior of Fumed Silica Suspensions," *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(33), 18650–18661, (2015).

Empirical Analysis of Causal Relationship between Electricity Production and Consumption Demand in Turkey Using Cobb-Douglas Model

Nihat PAMUK

Turkish Electricity Transmission Company, Sakarya, Turkey

(Received : 21.01.2016 ; Accepted : 05.02.2016)

ABSTRACT

Energy is one of the most crucial data of economical and social development in Turkey. Therefore, energy planners have to design different policies to direct justifiable energy consumption for which various modeling techniques need to be adopted. In this study, the main idea is the causality relationship between electricity production - consumption demand and economical growth in per capita and aggregate levels in the emerging economies during the period 2003 - 2014 by using Cobb Douglas Model and Granger causality tests. Electricity production and consumption demand in Turkey are studied through economical models for residential and industrial sectors. Industrial sector is the largest electricity consuming sector in Turkey. The economical model developed here focuses on the use of only significant variables that are not collinear. Hence, statistical tests have been used to recommend significant economical models. In Turkey, between 2003 and 2014, while real per capita Gross Domestic Product (GDP) growth averaged 16.3% per annum, annual electricity production and consumption growth averaged 11.67 %. In spite of the fact that real per capita GDP and electricity consumption demand are positively correlated, it is still not clear the direction of causality between real per capita GDP, electricity consumption. The positive impact of electricity production and consumption demand on the economical growth and the bidirectional causality between economical growth and electricity consumption are evaluated. The analysis shows that not all the socio - economic variables used in other studies can be useful for model representation for Turkey's electricity consumption. The chosen models provide a very small absolute difference with actual electricity consumption demand. Recently, government has been focusing in industrial development in non - hydrocarbon sectors. So, the study of electricity production and consumption in these two sectors is considered as significant. An understanding of relationship between electricity consumption and various socio - economic variables is expected to help the planners to make appropriate generation and transmission planning in the country.

Keywords : Energy policy, Empirical analysis, Cobb - Douglas model, Electricity production and consumption demand, Granger causality tests.

1. INTRODUCTION

Energy is a basic necessity for all human activities. Energy is also a basic driver that fuels socio - economic development of a country. Among the various energy sources, petroleum fuel is still considered as the major energy supplier in the world due to convenience in access and use. With oil supply and price shocks in 2008, the vulnerability of economic programs has been highlighted in different countries. Although oil shocks did happen in earlier times as well, but the global economic impact that was created in 2008 has lasted longer. This has required strategic thinking on energy source diversification, energy efficiency and alternatives to oil energy [1]. There were similar attempts made by the countries after the oil shocks in the past as well. There were attempts to initiate demand management, supply augmentation from alternative sources, retrofitting of energy using devices and reducing or replacing oil consumption. However, those efforts subsided once the oil supply resumed unabated. Recently, before the oil shock in 2008, many countries like Singapore had started avoiding electricity generation from oil for natural gas. In other countries, hydropower, wind and coal based technologies are being

considered as well. The availability of better technologies, for example, cogeneration in gas industry and critical and supercritical clean coal technologies [2] is being considered to move away from oil dependence at least to some extent.

Diversification of energy resources and the need to use resources efficiently and effectively is not only the need of oil importing countries, but also of oil exporting countries. Oil exporting countries are also diversifying economy away from hydrocarbon. Therefore, the practice of planning for energy consumption is also on the rise in oil exporting countries. Most of the studies found that there was unidirectional causality between electricity consumption and economical growth, while some studies such as [3, 4, 5, 6, 7] found that there was bidirectional causality between electricity consumption and economical growth. The direction of unidirectional causality varies from countries to countries. Some studies such as [8, 9, 10, 11] have found that there was unidirectional causality from electricity consumption to economical growth, while some studies such as [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18] have found that there was unidirectional causality from economical growth to electricity consumption.

In this study, in addition to other studies in the literature, "the modeling of income regions and number of

*Corresponding Author

e-posta: nihampamuk@gmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 415-420

households which supply domestic employment” is included in residential sector modeling part. Also, the industrial sector modeling part consists of “the sum of Consumer Price Index (CPI) and Gross Domestic Product (GDP) based on production minus revenue of mining operations”. The objective of this paper is to present economical model as a way to facilitate decision making for electricity generation to meet demand in residential and industrial sectors. Therefore, in the following section, major energy models are defined. Features of economical models follow the discussion. The paper concludes with discussion and conclusions.

2. ENERGY MODELS FOR PLANNING

Various energy models are used in practice for energy analysis and planning - focused on energy supply, energy demand and other factors. The models which consider energy supply focus mainly on extraction and distribution of energy sources. Market Allocation (MARKAL) model, developed by the Energy Technology Systems Analysis Program (ETSAP) of the International Energy Agency is used for obtaining low cost energy options and analyzing carbon restrictions [19]. This model accounts for energy cost but they are basically supply focused. The long range energy alternative model (LEAP) developed by Stockholm Environment Institute is another model, which can also be considered supply focused as it carries a very good inventory of available energy sources and the possible alternative when fully developed [20]. It does consider economics and environment as well for proposing energy policies. This is to note that some of these supply models can use optimization as their tools and others may use accounting or simulation as their basis for analysis.

The models which consider energy demand focus on demand management, that is, assessing demand and altering energy consumption pattern through the use of better technology, diversification of energy sources and adoption of voluntary and non-voluntary conservation measures. Demand management generally starts with the energy end-use analysis for a particular service, such as industrial water boiling or household cooking and then proceeds to analyze energy efficiency, energy utilization costs and options for changes in energy demand. One such model for energy end use analysis for cooking is called Energy Service Analysis Method (ESAM) proposed by Reister and Devine [21]. For a larger scale energy end use analysis, Model Evolution Demand Energy (MEDEE) can be used. In MEDEE, sectorial energy end-use, such as for energy consumption in transportation sector and residential sector, is analyzed and final energy demand is assessed [22].

The third type of models use hybrid methodology, by considering both supply distribution and demand management. They can also consider technology and goals more explicitly. Models such as input - output analysis and economical analysis can be considered as the hybrid models. Bildirici et al. have developed

comprehensive economical models for national energy planning by including at both conventional and non-conventional energy sources [4]. A review of 15 energy models focused on engineering economics has been compared in Worrell et al [23]. The authors have reviewed models such as All Modular Industry Growth Assessment (AMIGA), Energy Efficiency Resource Assessment (EERA) and Energy Simulation Model (ENUSIM) in their work. The authors have reviewed models that are focused on actual characteristics of individual technologies or group of technologies and the goal of the model. The model used in this paper is focused on time series data and the aim is to find a matching model of electricity consumption demand with various socio - economic factors in order to provide overall view on the impact of socio - economic development on electricity consumption. Therefore, economical modelings approach in the analysis of time series data have been used.

Atif et al., Adom et al., and Akinwale et al., found that there was unidirectional causality from electricity consumption demand to economical growth [11, 15, 17]. Hu et al. and Ogundipe et al. found that there was bidirectional causality between electricity consumption and economical growth [5, 6]. Nazlioglu et al., found that there was a bidirectional between electricity consumption and economical growth with linear Granger causality test, while there was no causality between economical growth and electricity consumption with nonlinear Granger causality test [7]. Bildirici et al., found that there was bidirectional causality between electricity consumption and economical growth in Belarus, Czech Republic, Hungary, Poland, Romania and unidirectional causality from electricity consumption to economical growth in Albania and unidirectional causality from electricity consumption to economical growth for Bulgaria and Slovakia in the long term [4]. Gurgul et al., found that there was bidirectional causality between GDP and electricity consumption demand [3]. Aslan et al., found that electricity consumption had a positive impact on economical growth and there was bidirectional causality between electricity consumption and economical growth [14].

This study mainly employed causality test using Cobb-Douglas model and co-integration method to identify the causal association between electricity production and consumption demand for economical growth in Turkey. It has concluded that causality run from energy consumption to GDP. It estimates the electricity demand function by employing the structural time series technique. It finds that the nature of relationship is not linear and deterministic, but it is stochastic. This study shows that adjustment process of energy production and consumption demand toward equilibrium is highly persistence when an appropriately threshold is reached.

3. FEATURES OF INDUSTRIAL AND RESIDENTIAL SECTOR IN TURKEY

In this section the main features of industrial sector and the residential sector is discussed.

3.1. Industrial Sector

Turkey's industrial sector is dominated by petrochemical industry as the country has heavily invested in the exploration, processing and export of oil and gas products. The other large industries in Turkey produce fertilizer, steel and cement. The Turkey Statistical Authority indicates that Turkey engages more than 90.000 people each in mining (including oil and gas) and manufacturing. There are about 100 companies in mining sector and about 2000 companies in manufacturing sector [24]. The numbers especially in the manufacturing sector has been growing in the past due to government's emphasis on the diversification of economy away from oil and gas. The contribution of petroleum industry in Gross Domestic Product (GDP) is over 50 % and manufacturing contributes to about 10 % of GDP. Data indicates that current rate of total GDP growth is about 18 %; the growth in industrial GDP is about 19 % and that of manufacturing is about 27 % [25]. The higher contribution of petroleum industry has an influence in the overall GDP growth in the country. Data indicates that the electricity consumption in industrial sector is growing by about 17 % on a year on year cumulative basis since 2000. This growth rate is almost close to the industrial GDP growth.

3.2. Residential Sector

The data obtained from the Statistics Authority of Turkey's total population stands at about 75.6 million in 2012 [26], which has been increasing at the rate of about 10 % per year due to natural birth and economical migrants. The population is spread in seven municipalities but about 35 % of the population resides in Istanbul, Ankara and Izmir municipalities [27]. Due to higher level of construction and other petrochemical based economic activities, many foreigners have come to Turkey for work. Although the annual population growth was only about 1.41 % until 2002, it shot up to about 1.38 % in 2003 and to about 1.33 % in 2005, thus resulting in a higher population growth over the past decade. Between 2010 and 2014, however, the population growth is recorded as less than 1.15 %. The Statistics Authority of Turkey projects that by 2023, Turkey's resident population can range from about 75.6 million to about 89 million [28].

The data further shows that between 2003 and 2014, the number of residential houses increased from about 137.000 to about 245.000 thus growing at an average rate of about 5 % per year. About 27 % of the residences are villas and apartments and about 53 % of the total houses in Turkey are rented. The household composition has also increased from about 4.3 members per household to about 6.7 members in 2014. Data further shows that 97 % of the residences are connected to grid electricity and the electricity consumption demand in residences has

increased by about 7.3 % between 2003 and 2014 [29]. Residences are the largest electricity consumers among all sectors in Turkey. There is a decrease in the per capita energy consumption but increase in total household energy consumption demand in Turkey.

4. COBB-DOUGLAS MODEL AND EMPIRICAL ANALYSIS OF CAUSALITY TEST

In this section, for analyzing electricity demand in Turkey, by economical models static log linear Cobb-Douglas model is used. The final models for electricity consumption in industrial and residential sectors proposed here are based on stepwise elimination of models in terms of their goodness of fit and elimination of variables in terms of their statistical significance. Any model showing goodness of fit below 75 % and those variables which are not statistically significant at the 95 % confidence interval level has been eliminated. Statistical significance of models is measured in terms of F - stat and t - stat. This study frequently employs GDP, electricity price as an argument to determine the income and price elasticities. These elasticities have been used to forecast future demand and design appropriate policy. In modeling electricity demand function, simple standard Cobb-Douglas type function form with constant electricity of scale is used. Cobb-Douglas type function is described by equation 1.

$$E_t = A_t O_t^\beta P_t^\gamma \quad (1)$$

Where E_t is electricity consumption demand, O_t represents real output and P_t electricity price. A_t is the deterministic term measured as $A_t = C_0 \exp(dt)$ where C_0 is a constant and (dt) is a linear time trend β and γ are the demand elasticities with respect to real output and electricity price respectively. After applying log transformation and substituting the value of A_t , it can be described by equation 2.

$$\log(E_t) = \log C_0 + dt + \beta \log(O_t) + \gamma \log(P_t) \quad (2)$$

The current electricity demand also depends on the previous year's demand. For this purpose, the modified dynamic model can be described by equation 3.

$$\log(E_t) = \log C_0 + dt + \alpha \log(E_{t-1}) + \beta \log(O_t) + \gamma \log(P_t) + \varepsilon \quad (3)$$

The expected sign of lagged value of electricity consumption demand is positive implying $\alpha > 0$. The expected sign of output is positive meaning $\beta > 0$. The prices can have positive or negative sign depending upon the level of development and possibility of alternative energy options. This implies $\gamma \geq 0$. ε is the error term.

4.1. Residential Models

Economical models were developed for residential sector by considering population data, total number of households and the household income, data which are available from the Statistical Authority. Electricity consumption data for a 2003 - 2014 is considered for analysis. The first model was developed by using total number of households and household income as

independent variables. The second model was developed by using population and household income as independent variables. The third model was developed by using only population as the independent variable. The fourth model was developed by using only household numbers as the independent variable. The four models are given below.

Model One: $Ln(\text{Residential Electricity}) = -3.54 + 0.96(\text{In of population}) - (0.142 \text{ In of household income})$

Model Two: $Ln(\text{Residential Electricity}) = -5.76 + 0.20(\text{In of income}) + (1.07 \text{ In of household number})$

Model Three: $Ln(\text{Residential Electricity}) = -2.04 + 0.278(\text{In of population})$

Model Four: $Ln(\text{Residential Electricity}) = -10.6 + 1.59(\text{In of household number})$

All the four models shown above have more than 90 % of goodness of fit. In terms of validity of the model, therefore, all the models can be considered for further testing. In terms of F - stat, it is found that none of the models posed a problem of collinearity. In model one, only population variable is shown as significant independent variable. In model two, household number shows a significant relationship. In terms of individual variables, the unitary models of population and household size (model three and model four) show high significance as well. As model three has higher goodness of fit and a lower deduction through intercept, model three for the purpose of identifying the trend of electricity consumption demand is used. Figure 1 shows that actual (A-GWh) and predicted (P-GWh) are closely correlated and the mean absolute error is only about 1.3 %.

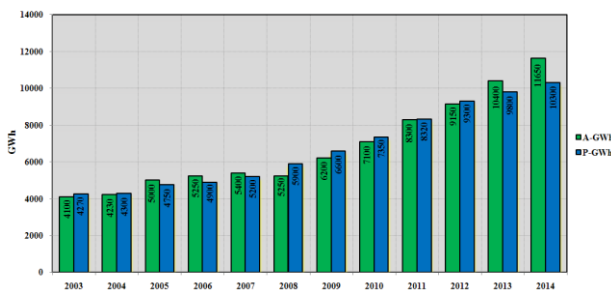


Figure 1: Model for electricity consumption demand in residential sector

4.2. Industrial Models

For the industrial sector, three parameters were found to have an effect on the total electricity consumption Consumer Price Index (CPI) and GDP for mining and quarrying (which include oil and gas), and GDP for manufacturing. These parameters are available from the Statistical Authority. With these variables, six different models are developed as shown below.

Model One: $Ln(\text{Industrial Electricity}) = 0.43 + 0.96(\text{In CPI}) - 0.038(\text{In mining GDP}) + 0.38(\text{manufacturing GDP})$

Model Two: $Ln(\text{Industrial Electricity}) = -2.20 + 1.32(\text{In CPI}) + 0.41(\text{In mining GDP})$

Model Three: $Ln(\text{Industrial Electricity}) = 0.27 + 0.36(\text{In manufacturing GDP}) + 0.95(\text{In CPI})$

Model Four: $Ln(\text{Industrial Electricity}) = 2.55 + 0.02(\text{In mining GDP}) + 0.54(\text{In manufacturing GDP})$

Model Five: $Ln(\text{Industrial Electricity}) = -0.66 + 0.76(\text{In mining GDP})$

Model Six: $Ln(\text{Industrial Electricity}) = 2.66 + 0.56(\text{In manufacturing GDP})$

Figure 2 shows the individual fit of actual (A-GWh) and predicted (P-GWh) electricity consumption demand in Turkey’s industrial sector. Figure 2 shows more difference between the actual and predicted electricity from the year 2011. The data shows that electricity consumption during 2010 and 2011 were almost the same values. The recession in 2011 could be one of the reasons as the demand might have subsided and this might had an impact on the production capacity of manufacturing sector. This effect can be seen with a lag effect in the projections during 2011 - 2014. Nevertheless, the mean absolute percentage error shows that the projected data is only about 5% out of actual consumption for the period analyzed here. For a vast economical sector like manufacturing, this adjustment of consumption by about 5 % is quite acceptable by planners. All the models have more than 90 % goodness of fit and they do not show any collinearity. However, in terms of individual variables, all models do not fit well in terms of t - stat, the worst one being the model one for which combination of all variables proved insignificant in statistical terms. This shows that, based on the eleven year statistics on data, electricity consumption demand in electricity sector cannot be predicted with a combination of these variables.

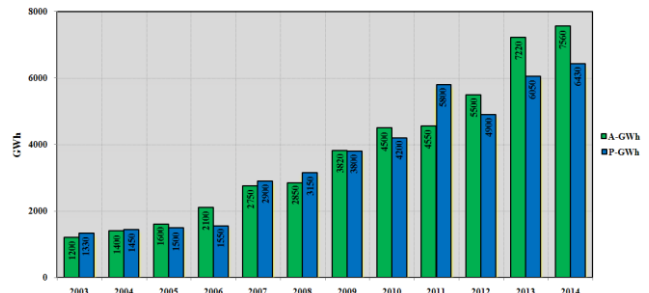


Figure 2: Model for electricity consumption demand in industrial sector

For model two, both variables do not fare well in 95 % confidence interval. For model three, manufacturing GDP is found as significant variable. These two models indicate that CPI may not be a good measure for economical model. CPI in this case was assumed as a proxy of purchasing power for local industrial goods, however, it is not showing any significance in terms statistical relationship. For model four, variables do not show any significance in the relationship. Model five and model six are unitary models and show significance in

terms of relationship with variables. Between these two models, the relation with manufacturing GDP (model six) fares better in terms of goodness of fit, collinearity and t - stat. Therefore, model six is used here for trend analysis.

The economic activity of Turkey's economy in industrial sector for the period 2003-2014, the GDP has increased from 162.1 billion TL in 2003 to 679.28 billion TL in 2014. This period represents an approximately constant rapid growth with an annual average growth rate of 11.6%. At the same time, electricity consumption demand has been rising year by year. Figure 1 and figure 2 also show an upward trend both in electricity consumption demand and GDP over this period. Electricity consumption demand came to 32.87 MTCE in 2014, compared to 5.77 MTCE in 2003, with an average annual growth rate of 7.39%. During the study period, the share of the residential sector continuously increases from 9.5% to 28.3% and the share of the GDP increases from 11.6% to 29.3%. The industrial sector has a dominant share and its importance has increased from a share of 10.7% in 2003 to 27.2% in 2014.

The findings show that price sensitivity has indeed changed since the 2007: it has decreased in absolute values from 2003 in 2007 to 0.819 in 2014. The elasticity stabilized at approximately 0.76 showing that the industrial sector has experienced an inelastic demand. In other words, the behavior of industrial consumers did not vary significantly during the 2003. These findings demonstrate that sensitivity of consumers to price fluctuations becomes smaller in absolute terms, while the real prices of electricity declined 2003 to 2007 period. There is a substitution between the increasing shares of residential sector, GDP and industrial sector. From the economic analysis, one can conclude that there is a shift in the Turkey economy structure towards industrial sector, but the GDP still remains the dominant position. Therefore, a contribution due to the economical structure effect on electricity consumption demand is expected.

5. CONCLUSIONS

This paper has investigated the causal relationship between electric power consumption demand in residential and industrial sector, GDP and financial development using static log linear Cobb Douglas model and Granger causality tests over the period 2003 - 2014. The efforts of investigation are culminated into two main objectives in this paper. The first objective is focus on examining whether the electric consumption of Turkey exhibit any form of non-linearity that is of economical interest. To this end the Granger causality tests are used in order to determine the presence or lack thereof linear or non-linear dependence.

The data show that electricity consumption demand in residential sector is more than 30% higher than that in the industrial sector, thus signifying the prevalence of low electricity intensity industry in Turkey. That is the reason why there was a statistically insignificant relation of electricity with mining. However, the relation between

electricity consumption and manufacturing is significant. In terms of residential sector, the significance is only in terms of population. Electricity requirements in Turkey is mainly used for space conditioning, heating in at least two months in a year to cooling for about eight months in a year. Statistical relation is not significant with households.

The purpose of the paper is to understand the effect of socio economic variables, which have been attained. The difficulty was mainly on the collection of data on socio economical factors, and therefore, the models could be enhanced further by using more factors, like capacity of industries, price of electricity and the type of industry. Surveys might have to be done to see which type of manufacturing industries in Turkey are more energy intensive. The main conclusions drawn from the present study may be summarized as follows;

- Electricity consumption in Turkey has been rising year by year with economical growth. In 2014, electricity consumption demand came to 32.87 MTCE, which accounted for 21.64% of total energy consumption demand. The industrial sector consumed more than 75% of total electricity over the period 2003-2014.
- The economic activity effect is the most important contributor to increase electricity consumption demand in Turkey and the sector electricity share effect is another important factor leading to the rapid growth of electricity demand. The economic structure effect plays a minor role to increase electricity demand over the period 2003 - 2014, and the energy intensity effect plays the dominant role in decreasing electricity consumption demand.
- The period from 2003 - 2007 represents a re-coupling effect, while the other time interval shows a weak decoupling effect. The most important change explaining the achieved dissociation is the energy intensity effect.

Based on the findings, the policies that promote energy consumption and economical growth are recommended. One way of achieving this is through the adoption of appropriate energy pricing framework that takes cognizance of both the present and the future production.

REFERENCES

- [1] Lee, C. C., Chang, C. P., "Energy consumption and GDP revisited: a panel analysis of developed and developing countries", *Energy economics*, 29(1): 1206-1223, (2007)
- [2] Wang, H., Nakata, T., "Analysis of the market penetration of clean coal technologies and its impacts in China's electricity sector", *Energy*, 31(1): 338-351, (2009)
- [3] Gurgul, H., Lach, L., "The electricity consumption versus economic growth of the Polish economy", *Energy Economics*, 34(2): 500-510, (2011)
- [4] Bildirici, M. E., Bakırtaş, T., Kayıkcı, F., "Economic growth and electricity consumption: auto regressive distributed lag analysis", *Journal of Energy in Southern Africa*, 23(4): 29-45, (2012)

- [5] Hu, X., Lin, X., "Study of the relationship between electricity consumption and GDP growth in hainan international tourism island of China", *Research in World Economy*, 4(1): 109-115, (2013)
- [6] Ogundipe, A. A., Apata, A., "Electricity consumption and economic growth in Nigeria", *Journal of Business Management and Applied Economics*, 2(4): 1-14, (2013)
- [7] Nazlioglu, S., Kayhan, S., Adiguzel, U., "Electricity consumption and economic growth in Turkey: cointegration, linear and nonlinear granger causality", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 9(4): 315-324, (2014)
- [8] Roula, I. L., "The sensitivity of the South African industrial sector's electricity consumption to electricity price fluctuations", *Journal of Energy in Southern Africa*, 25(4): 2-10, (2014)
- [9] Milorad, B., Alexandre, P. P., Frederic, M., Dimitri, B., Dragan, C., Slobodan, D., Danijela, N., "Photovoltaic electricity production in a residential house on reunion", *Journal of Energy in Southern Africa*, 24(2): 50-56, (2013)
- [10] Augustine, C. O., Damilola, F. A., "Energy consumption, energy prices and economic growth: causal relationships based on error correction model", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 5(2): 408-414, (2015)
- [11] Atif, S. M., Siddiqi, M. W., "The electricity consumption and economic growth nexus in Pakistan: A new evidence", *Leibniz Information Centre for Economics*, <http://www.econstor.eu/handle/10419/65688>, (2014)
- [12] Ibrahim, D. R., Agboola, H. Y., "Energy consumption-economic growth nexus: evidence from linear and nonlinear models in selected African countries", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 5(2): 558-564, (2015)
- [13] Ming, Z., Wenwen, W., "Decoupling analysis of electricity consumption from economic growth in China", *Journal of Energy in Southern Africa*, 24(2): 57-66, (2013)
- [14] Aslan, A., "Causality between electricity consumption and economic growth in Turkey: An ARDL bounds testing approach", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, 9(1): 25-31, (2014)
- [15] Adom, P. K., "Electricity consumption - economic growth nexus: the Ghanaian case", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 1(1): 18-31, (2011)
- [16] Mohamed, O., "Dynamic asymmetries in the electric consumption of the GCC countries", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 5(2): 461-467, (2015)
- [17] Akinwale, Y., Jesuleye, O., Siyanbola, W., "Empirical analysis of the causal relationship between electricity consumption and economic growth in Nigeria", *Journal of Economics, Management & Trade*, 3(3): 277-295, (2013)
- [18] Nyakundi, M. M., "Short and long run analysis of factors affecting electricity consumption in sub-sharan Africa", *International Journal of Energy Economics and Policy*, 5(3): 639-646, (2015)
- [19] Sulukan, E., Sağlam, M., Uyar, T. S., Kırılıdoğ, M., "Determining optimum energy strategies for Turkey by Markal model", *Journal of Naval Science and Engineering*, 6(1): 27-38, (2010)
- [20] <http://www.sei-international.org/projects?prid=189>, (2011)
- [21] Reister, D. B., Warren, D., Devine, Jr., "Total costs of energy services", *Energy*, 6(4): 305-315, (1981)
- [22] Lapillone, B., Chateau, B., "The MEDEE models for long term energy demand forecasting", *Socio - Economic Planning Sciences*, 15(2): 53-58, (1981)
- [23] Worrell, E., Ramesohl, S., Boyd, G., "Advances in energy forecasting models based on engineering economics", *Annual Review of Environment and Resources*, 29(1): 345-381, (2004)
- [24] State Planning Organization (DPT), "Ninety-five year development plan", *Energy Private Specialization Commission Report*, No: DPT-2610-ÖK-621, Ankara, (in Turkish), (2011)
- [25] Lise, W., Montfort, K., "Energy consumption and GDP in Turkey: is there a co-integration relationship?", *Energy Economics*, 29(1): 1166-1178, (2007)
- [26] http://www.nvi.gov.tr/11,2012ana_Sayfa_Dogum_Olum_Istatistikleri.html, (2012)
- [27] Turkish Industrialists' and Businessmen's Association (TUSIAD), "The assesment of Turkey's energy strategy at 21. century", No: *TUSIAD-T/2012-02/239*, İstanbul, (in Turkish), (2011)
- [28] Turkish Industrialists' and Businessmen's Association (TUSIAD), "Future view to energy sector supply, demand and policies", No: *TUSIAD-T/2012-11/136*, İstanbul, (in Turkish), (2012)
- [29] Turkish Electricity Transmission Corporation (TEIAS), "Electricity statistics", *TEIAS Publishing Report*, Ankara, (in Turkish), (2015)

Exact Solution to Elastic Behavior of Periodic Heat Generating Solid Cylinder

Tunç APATAY

Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Gazi University, Ankara, Turkey

(Received : 22.01.2016 ; Accepted : 19.03.2016)

ABSTRACT

The objective of this study is to develop analytical solution of thermally induced stress and deformation in a periodic heat generating solid cylinder. The cylinder is initially at zero temperature, but for times greater than zero, heat is generated and consumed internally at a time dependent rate. The solution of this complicated problem consists of two parts. In the first part, transient heat conduction equation is formulated and solved by the use of Duhamel's theorem. The second part on the other hand consisted of the formulation of governing elastic equation coupled with the temperature gradient. This equation is nothing but the thermoelastic equation of the cylinder. Analytical solution of the thermoelastic equation reveals the distributions of stress, strain and displacement within the cylinder at a given time instant. Two different periodic functions are handled to describe periodic heat generation in the cylinder. Although periodic, the second function eventually decays to zero.

Keywords: Transient heat generation, periodic heating, Duhamel's theorem, thermoelasticity, generalized plane strain

1. INTRODUCTION

The analysis of thermoelastic deformations in cylindrical coordinates such as cylinders and rods are of great importance in engineering especially in nuclear reactors, aerospace industry and chemical applications [1-4]. Because of the temperature gradient changes, thermal stresses arise in the cylinder, and they must be taken into account in the design to save production costs. For this reason many researchers have investigated the subject in the past under different conditions and different assumptions.

But most of the studies on the thermoelastic behaviors of the cylinders in the literature are steady-state. However, for some applications like laser heating, nuclear reactors and chemical applications, the heat conduction problem is transient. Tu and Lee [5] solved the heat conduction problem analytically by using the shifting functions for hollow cylinders with transient boundary condition. Cossali [6] obtained the analytical solution of periodic heat conduction in a homogeneous cylinder. Fazeli et al. [7] solved the two-dimensional heat transfer problem by using the Duhamel's theorem for a hollow cylinder subjected to transient boundary condition.

Orcan [8] obtained the steady-state stress distribution in an elastic-ideally plastic cylindrical rod with uniform internal energy generation. Later, he also calculated the residual stresses and secondary plastic flow in the rod under similar assumptions [9]. Arslan et al. [10] studied the elastic-plastic stress distribution in a rotating solid shaft subjected to a temperature cycle. Eraslan and Orcan [11] investigated the transient thermoelastic-plastic deformation of a heat generating tube. Deshmukh et al. [12] discussed the thermal stresses in a hollow circular cylinder subjected to arbitrary initial temperature and

time dependent heat flux which is applied at the outer circular boundary whereas the inner circular boundary is isolated. Most recently Eraslan and Apatay [13] obtained the thermoelastic behavior of a solid cylinder subjected to time-dependent periodic boundary condition by using Duhamel's theorem. Bhongade and Durge discussed the thermal stresses in a hollow cylinder with internal heat generation [14], and Walde et al. [15] discussed the thermoelastic response of a solid cylinder, in which sources are generated according to a linear function of the temperature, with boundary conditions of the radiation type, by applying integral transform techniques.

In this paper, the thermoelastic response of a long solid cylinder subjected to periodic heat generation is studied by analytical means, applying the uncoupled theory of thermoelasticity. The heat transfer equation is solved by the use of Duhamel's theorem. Two different heat generation functions are handled. The thermoelastic stress and displacement distributions are obtained using the temperature distribution. The results relevant to engineering practice are presented graphically.

2. FORMULATION OF THE PROBLEM

2.1. Transient Temperature Distribution in the Cylinder

A long solid cylinder with radius b is considered. The cylinder is initially at zero temperature and for times $t > 0$ heat is generated or consumed within the cylinder at a time-dependent rate of $g(t)$ while its surface $r = b$ is kept at zero temperature. The transient temperature distribution in the cylinder is described by the heat conduction equation [1]. In terms of dimensionless variables it reads

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial \bar{r}^2} + G(\tau); \quad 0 \leq \bar{r} < 1, \quad \tau > 0 \quad (1)$$

The boundary conditions and the initial condition that complete the heat transfer model are

*Corresponding Author

e-mail: tapay@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 421-426

$$\begin{aligned} \bar{T}(0, \tau) &= \text{finite}, \\ \bar{T}(1, \tau) &= 0, \\ \bar{T}(\bar{r}, 0) &= 0. \end{aligned} \tag{2}$$

In the above, $\bar{r} = r/b$ is the dimensionless radial coordinate, $\bar{T} = T/T_0$ the dimensionless temperature, $\tau = \alpha_T t/b^2$ the normalized time, $G(\tau) = g(t)b^2/kT_0$ the dimensionless heat generation rate, T_0 a reference temperature, α_T the thermal diffusivity and k the thermal conductivity. Assuming that $G(\tau)$ has no discontinuities, the solution of the heat conduction equation is obtained by the use of Duhamel's theorem as [1]

$$\bar{T}(\bar{r}, \tau) = \int_0^\tau G(\beta) \frac{\partial}{\partial \tau} \Phi(\bar{r}, \tau - \beta) d\beta \tag{3}$$

in which $\Phi(\bar{r}, \tau)$ represents the solution of the auxiliary problem defined by

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \tau} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial \Phi}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \bar{r}^2} + 1; \quad 0 \leq \bar{r} < 1, \quad \tau > 0 \tag{4}$$

$$\Phi(0, \tau) = \text{finite},$$

$$\Phi(1, \tau) = 0, \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{r}, 0) &= 0. \end{aligned}$$

The nonhomogeneity in the governing equation for $\Phi(\bar{r}, \tau)$ is handled by proposing a solution of the form

$$\Phi(\bar{r}, \tau) = Y(\bar{r}, \tau) + Z(\bar{r}) \tag{6}$$

Substituting this proposed solution into Eq. (4) the differential equation for $\Phi(\bar{r}, \tau)$ is split into two differential equations in the forms

$$\frac{d^2 Z}{d\bar{r}^2} + \frac{1}{\bar{r}} \frac{dZ}{d\bar{r}} + 1 = 0; \quad Z(0) = \text{finite}, \quad Z(1) = 0 \tag{7}$$

and

$$\frac{\partial Y}{\partial \tau} = \frac{1}{\bar{r}} \frac{\partial Y}{\partial \bar{r}} + \frac{\partial^2 Y}{\partial \bar{r}^2}; \quad 0 < \bar{r} < 1, \quad \tau > 0 \tag{8}$$

Subject to

$$Y(0, \tau) = \text{finite},$$

$$Y(1, \tau) = 0, \tag{9}$$

$$Y(\bar{r}, 0) = -Z(\bar{r}).$$

The solutions are then obtained as

$$Z(\bar{r}) = \frac{1 - \bar{r}^2}{4} \tag{10}$$

and

$$Y(\bar{r}, \tau) = -2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n^2 \tau} \frac{J_0(\lambda_n \bar{r})}{\lambda_n^3 J_1(\lambda_n)} \tag{11}$$

in which J_0, J_1 represent Bessel functions of the first kind of order zero and one, respectively, and λ_n for $n = 1, 2, \dots$ are the positive roots of the eigenvalue equation

$$J_0(\lambda_n) = 0 \tag{12}$$

By superposition, the solution of the auxiliary equation is written as

$$\Phi(\bar{r}, \tau) = \frac{1 - \bar{r}^2}{4} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\lambda_n^2 \tau} \frac{J_0(\lambda_n \bar{r})}{\lambda_n^3 J_1(\lambda_n)} \tag{13}$$

and consequently, the solution to transient temperature distribution in the cylinder takes the final form

$$\bar{T}(\bar{r}, \tau) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\lambda_n \bar{r})}{\lambda_n J_1(\lambda_n)} \int_0^\tau G(\beta) e^{-\lambda_n^2(\tau-\beta)} d\beta \tag{14}$$

2.1.1 Integrals

The integral

$$I(\tau, \lambda_n) = \int_0^\tau G(\beta) e^{-\lambda_n^2(\tau-\beta)} d\beta \tag{15}$$

in Eq. (14) is referred to as generation integral. Given the generation function $G(\beta)$ it is evaluated and used in the temperature distribution afterwards. In this work, two different generation rates are taken into consideration. These are as follows.

Rate 1. It is sinusoidal described by

$$G(\beta) = A \sin \tau \tag{16}$$

in which A is the load parameter. The corresponding generation integral is evaluated as

$$I = I_1 = \frac{A[e^{-\lambda_n^2 \tau} + \lambda_n^2 \sin \tau - \cos \tau]}{1 + \lambda_n^4} \tag{17}$$

Rate 2. The periodic and decaying generation rate and the corresponding generation integral are

$$G(\beta) = A \tau e^{-\tau/2} \cos \tau \tag{18}$$

and

$$\begin{aligned} I &= I_2 \\ &= -\frac{4Ae^{-\lambda_n^2 \tau} (3 + 4\lambda_n^2 - 4\lambda_n^4) [+ \lambda_n^2 \sin \tau - \cos \tau]}{(5 - 4\lambda_n^2 + 4\lambda_n^4)^2} \\ &+ \frac{4Ae^{-\tau/2} [4 + 5\tau + 4\lambda_n^4 - 4\lambda_n^2(2 + \tau)] \sin \tau}{(5 - 4\lambda_n^2 + 4\lambda_n^4)^2} \\ &+ \frac{2Ae^{-\tau/2} [6 - 5\tau + 8\lambda_n^6 - 4\lambda_n^2(2 + 3\tau) + 2\lambda_n^2(4 + 7\tau)] \cos \tau}{(5 - 4\lambda_n^2 + 4\lambda_n^4)^2} \end{aligned} \tag{19}$$

where A represents a load parameter as before.

2.2 Thermoelastic Solution

Small deformations and a state of generalized plane strain are assumed. In order to determine transient stresses and deformations in the solid cylinder, dimensionless forms of the basic equations are utilized [2,3]. These are the following.

The equation of equilibrium

$$\frac{d\bar{\sigma}_r}{d\bar{r}} + \frac{\bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_\theta}{\bar{r}} = 0 \tag{20}$$

the strain-displacement relations

$$\bar{\epsilon}_\theta = \frac{\bar{u}}{\bar{r}}, \quad \bar{\epsilon}_r = \frac{d\bar{u}}{d\bar{r}} \tag{21}$$

and the equations of the generalized Hooke's law

$$\bar{\epsilon}_r = \bar{\sigma}_r - \nu(\bar{\sigma}_\theta + \bar{\sigma}_z) + \bar{\alpha} \bar{T}, \tag{22}$$

$$\bar{\epsilon}_\theta = \bar{\sigma}_\theta - \nu(\bar{\sigma}_r + \bar{\sigma}_z) + \bar{\alpha} \bar{T}, \tag{23}$$

$$\bar{\epsilon}_z = \bar{\sigma}_z - \nu(\bar{\sigma}_r + \bar{\sigma}_\theta) + \bar{\alpha} \bar{T}, \tag{24}$$

In these equations $\bar{\sigma}_j = \sigma_j/\sigma_Y$ represents a dimensionless stress component, $\bar{\epsilon}_j = \epsilon_j E/\sigma_Y$ a normalized strain component, $\bar{u} = Eu/\sigma_Y b$ the dimensionless radial

displacement, $\bar{\alpha} = E\alpha T_0/\sigma_Y$ the dimensionless coefficient of thermal expansion, ν the Poisson's ratio, E the modulus of elasticity and σ_Y the uniaxial yield stress of the material. In a state of generalized plain strain $\bar{\epsilon}_z = \epsilon_0$ is constant and Eq. (24) can be solved for the axial stress to give

$$\bar{\sigma}_z = \epsilon_0 + \nu(\bar{\sigma}_r + \bar{\sigma}_\theta) - \bar{\alpha}\bar{T}, \tag{25}$$

Combination of this equation with strain-displacement relations, Eq. (21) and the equations of generalized Hooke's law, Eqs. (22)-(23) allow one to formulate the stress displacement relations as

$$\bar{\sigma}_r = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\nu\epsilon_0 + \frac{\nu\bar{u}}{\bar{r}} + (1-\nu)\bar{u}' \right] - \frac{\bar{\alpha}\bar{T}}{1-2\nu}, \tag{26}$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \left[\nu\epsilon_0 + \frac{(1-\nu)\bar{u}}{\bar{r}} + \nu\bar{u}' \right] - \frac{\bar{\alpha}\bar{T}}{1-2\nu}, \tag{27}$$

A prime above denotes differentiation with respect to the dimensionless radial coordinate r . Substituting these stresses in the equation of equilibrium, Eq. (20), leads to the thermoelastic equation in terms of radial displacement

$$\bar{r}^2 \frac{d^2\bar{u}}{d\bar{r}^2} + \bar{r} \frac{d\bar{u}}{d\bar{r}} - \bar{u} = \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \bar{\alpha}\bar{r}^2 \frac{\partial\bar{T}}{\partial\bar{r}} \tag{28}$$

This is a second order nonhomogeneous Cauchy-Euler type differential equation which assumes the exact solution

$$\bar{u}(\bar{r}) = C_1\bar{r} + \frac{C_2}{\bar{r}} + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \left(\frac{\bar{\alpha}}{\bar{r}}\right) \int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta \tag{29}$$

It is to be noted that

$$\lim_{\bar{r} \rightarrow 0} \frac{1}{\bar{r}} \int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta = \lim_{\bar{r} \rightarrow 0} \bar{r}\bar{T}(\bar{r}, \tau) = 0 \tag{30}$$

Since the radial displacement \bar{u} must be finite at the center of the solid cylinder ($r = 0$) C_2 must be zero. Hence, we list the equations for the displacement and the stresses

$$\bar{u} = C_1\bar{r} + \frac{(1+\nu)}{(1-\nu)} \left(\frac{\bar{\alpha}}{\bar{r}}\right) \int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta, \tag{31}$$

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\nu\epsilon_0 + C_1}{(1+\nu)(1-2\nu)} - \frac{\bar{\alpha}}{1-\nu} \frac{1}{\bar{r}^2} \int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta, \tag{32}$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{\nu\epsilon_0 + C_1}{(1+\nu)(1-2\nu)} + \frac{\bar{\alpha}}{1-\nu} \frac{1}{\bar{r}^2} \int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta - \frac{\bar{\alpha}\bar{T}(\bar{r}, \tau)}{1-\nu}, \tag{33}$$

$$\bar{\sigma}_z = \frac{(1-\nu)\epsilon_0 + 2\nu C_1}{(1+\nu)(1-2\nu)} - \frac{\bar{\alpha}\bar{T}(\bar{r}, \tau)}{1-\nu}. \tag{34}$$

These equations contain two unknowns; namely C_1 and ϵ_0 to be determined. Since the surface of the solid cylinder is free of stress we have the condition

$$\bar{\sigma}_r(1) = 0 \tag{35}$$

Another condition can be formulated by making use of the fact that the total axial force F_z must vanish as the ends of the solid cylinder are free. This leads to

$$F_z = \int \bar{\sigma}_z dA = 2\pi \int_0^1 \bar{r}\bar{\sigma}_z d\bar{r} = 0 \tag{36}$$

Application of these conditions reveal that

$$C_1 = \frac{\bar{\alpha}(1-3\nu)}{1-\nu} \int_0^1 \bar{r}\bar{T}(\bar{r}, \tau) d\bar{r} \tag{37}$$

$$\epsilon_0 = 2\bar{\alpha} \int_0^1 \bar{r}\bar{T}(\bar{r}, \tau) d\bar{r} \tag{38}$$

Finally, the complete thermoelastic solution of the solid cylinder takes the form

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\bar{\alpha}}{1-\nu} \left(\int_0^1 \bar{r}\bar{T}(\bar{r}, \tau) d\bar{r} - \frac{1}{\bar{r}^2} \int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta \right), \tag{39}$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{\bar{\alpha}}{1-\nu} \left(\int_0^1 \bar{r}\bar{T}(\bar{r}, \tau) d\bar{r} + \frac{1}{\bar{r}^2} \int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta - \bar{T}(\bar{r}, \tau) \right), \tag{40}$$

$$\bar{\sigma}_z = \frac{\bar{\alpha}}{1-\nu} \left(2 \int_0^1 \bar{r}\bar{T}(\bar{r}, \tau) d\bar{r} - \bar{T}(\bar{r}, \tau) \right), \tag{41}$$

$$\bar{u} = \frac{\bar{\alpha}}{1-\nu} \left[\bar{r}(1-3\nu) \int_0^1 \bar{r}\bar{T}(\bar{r}, \tau) d\bar{r} + \frac{1+\nu}{\bar{r}} \int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta \right]. \tag{42}$$

The integrals in the solution are evaluated as

$$\int_0^1 \bar{r}\bar{T}(\bar{r}, \tau) d\bar{r} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n^2} I(\tau, \lambda_n) \tag{43}$$

$$\int_0^{\bar{r}} \eta\bar{T}(\eta, \tau) d\eta = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\bar{r}J_1(\lambda_n\bar{r})}{\lambda_n^2 J_1(\lambda_n)} I(\tau, \lambda_n) \tag{44}$$

in which $I(\tau, \lambda_n)$ refers to the generation integral in Eq. (15). For the first generation rate it is to be replaced by I_1 in Eq. (17) and for the second by I_2 in Eq. (19).

3. NUMERICAL RESULTS AND DISCUSSION

First, verification of the derived solution is performed against a finite element numerical solution [16]. The distributions of the von Mises stress in the cylinder at various time instants are calculated and compared with the results of the numerical solution for this purpose. The von Mises stresses $\bar{\sigma}_{vM}$ are obtained from [17]

$$\bar{\sigma}_{vM} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_\theta)^2 + (\bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_z)^2 + (\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_z)^2]} \tag{45}$$

It is well known that the deformation is elastic as long as $\bar{\sigma}_{vM} \leq 1$. Since $\bar{\sigma}_{vM}$ is a function of all three stress

components a small error in one of them may result in apparent discrepancies in the results. The parameter values $\nu = 0.3, A = 3.0, \bar{\alpha} = 1.75$ are used in these calculations. The results of the verification calculations are presented in Figure 1a and Figure 1b on which solid lines belong to the results of this work and dots to the results of numerical solution [16]. Figure 1a is based on Rate 1 as described by Eq. (16) while Figure 1b on Rate 2 given by Eq. (18).

Corresponding to the same values of the parameters ν, A and $\bar{\alpha}$, variation of the temperature \bar{T} and its gradient $d\bar{T}/d\bar{r}$ with time at the radial position $\bar{r} = 0.5$ are calculated and plotted in Figure 2a and Figure 2b. The behavior corresponding to Rate 1 is depicted in Figure 2a. One period of generation is covered Figure 2a. In Figure 2b the decaying nature of the generation rate with time is visualized.

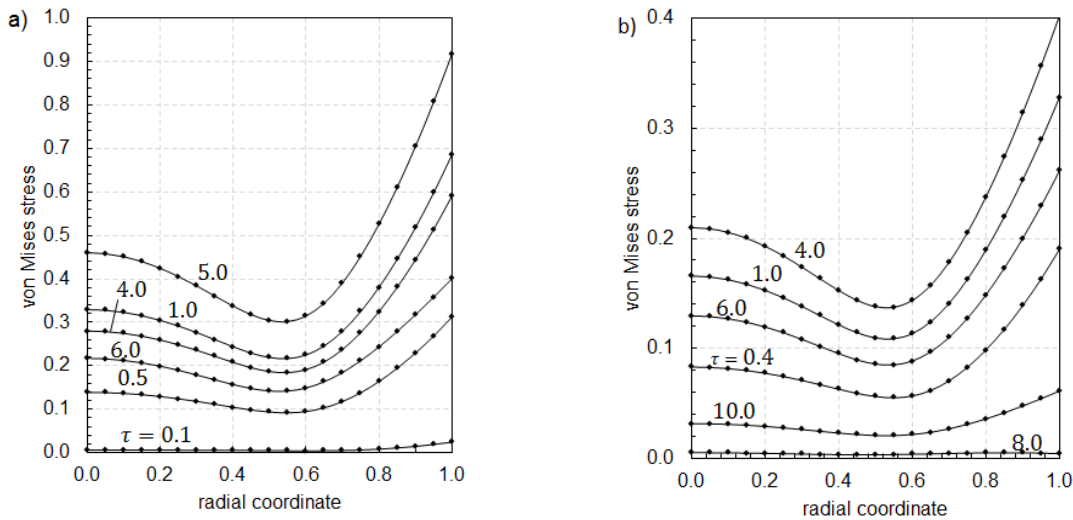


Figure 1. Distributions of the von Mises stress in the cylinder at various time instants based on a) Rate, 1 b) Rate 2, for the parameter set $\nu = 0.3, A = 3.0$ and $\bar{\alpha} = 1.75$.

As seen in these figures, perfect agreement is obtained between the results of this work and finite element solution verifying the present analytical model for both rates. Note also that the largest values of $\bar{\sigma}_{vM}$ occur at the surface of the cylinder, hence failure with respect to plastic deformation occurs at the surface of the cylinder as the load parameter A is further increased.

On the other hand, variations of the stress components, the von Mises stress and the radial displacement with time at the same radial location ($\bar{r} = 0.5$) are plotted in Figure 3a and Figure 3b. It is obvious in these figures that the deformation is purely elastic as $\bar{\sigma}_{vM} \leq 1$ throughout and compressive as well as tensile stresses may be found

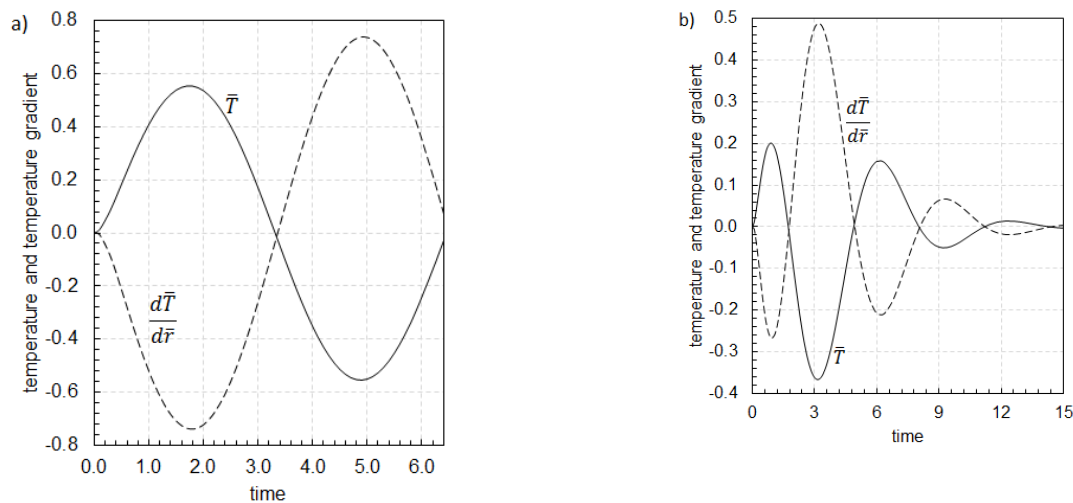


Figure 2. Variations of temperature and temperature gradient with time at $\bar{r} = 0.5$ based on a) Rate 1, b) Rate 2, for the parameter set $\nu = 0.3, A = 3.0$ and $\bar{\alpha} = 1.75$.

in the cylinder according as the temperature gradient is negative or positive.

height. The same is true for Rate 2 as time gets as large as $\tau = 15$ as shown in Figure 4b. It is apparent that the

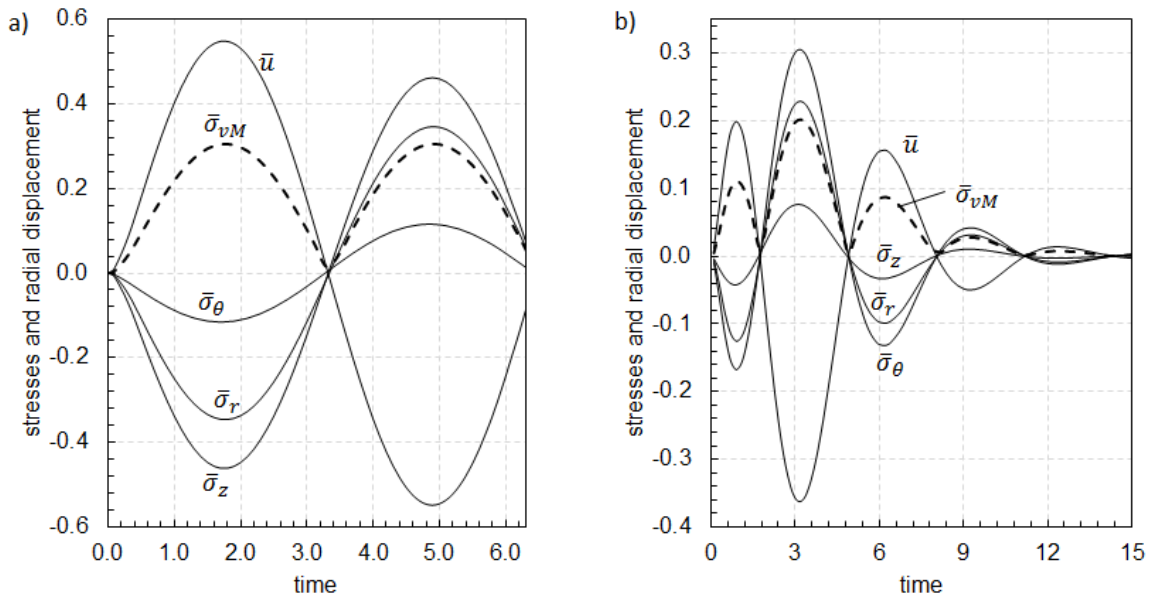


Figure 3. Variations of the stress components, the von Mises stress and the displacement with time at $\bar{r} = 0.5$ based on a) Rate 1, b) Rate 2, for the parameter set $\nu = 0.3$, $A = 3.0$ and $\bar{\alpha} = 1.75$.

The rod may expand or contract in the axial direction as the ends are free. The change in height of the cylinder at any time instant is obtained by multiplying the axial strain with its height. The results of these calculations are depicted in Figure 4a and Figure 4b. The change of height when the heat is generated according to Rate 1 over one period is shown in Figure 4a. As seen in this figure when one period is completed the cylinder returns to its original

4. CONCLUSION

In this study, the thermoelastic problem of a solid cylinder subjected to periodic internal heat generation was solved analytically by using Duhamel's theorem. Two different types of periodic function were handled to define the internal heat generation. Although one is periodic, the second function eventually decays to zero. In the first part of the study, the temperature distribution

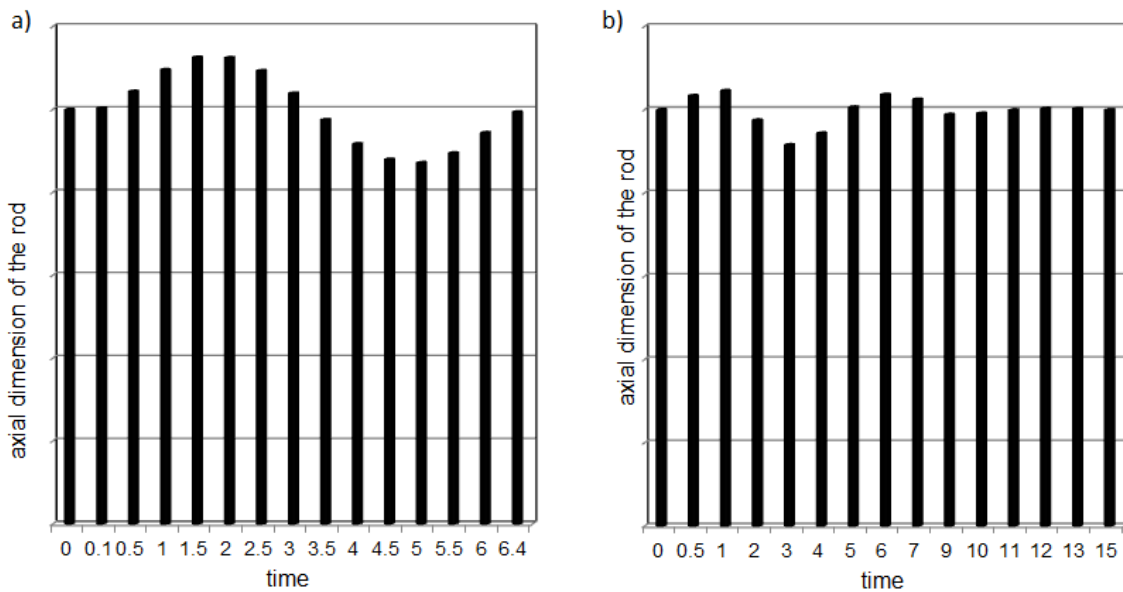


Figure 4. The changes in the height of the cylinder with time based on a) Rate 1, b) Rate 2 for the parameter set $\nu = 0.3$, $A = 2.0$ and $\bar{\alpha} = 1.75$.

in the cylinder was obtained then this distribution was used for the calculation of the elastic stresses and radial displacement distributions.

The elastic results show that the temperature distribution and the radial displacement distribution have similar behavior. On the other hand, the temperature gradient and the stress distributions have similar behavior in the cylinder. Parameter A affects the magnitude of the internal heat generation and $\bar{\alpha}$ is related to the effects of material properties on the calculations. The results show that the equivalent von Mises stress values always occur at the surface of the cylinder when the heat generation magnitude is increased, means that the yielding always starts at the outer surface according to this criteria.

REFERENCES

- Hahn W.D., Özişik M.N., "Heat Conduction", *John Wiley & Sons*, New Jersey, (2012)
- Timoshenko S., Goodier J.N., "Theory of Elasticity", *McGraw-Hill*, New York, (1970)
- Ugural A.C., Fenster S.K. "Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity", *Prentice-Hall*, London, (2012)
- Lu X., Tervola P., Viljanen M., "Transient analytical solution to heat conduction in composite circular cylinder", *Int J Heat Mass Tran*, 49: 341 – 348, (2006)
- Tu T.W., Lee S.Y., "Analytical solution of heat conduction for hollow cylinders with time-dependent boundary condition and time-dependent heat transfer coefficient", *J Applied Math*, vol 2015, Article ID-203404.
- Cossali G.E., "Periodic heat conduction in a solid homogeneous finite cylinder", *Int J Therm Sci*, 48: 722-732, (2009)
- Fazeli, H., Abdous, M.A., Karabi, H., Moallemi, N., Esmaili M. "Analysis of transient heat conduction in a hollow cylinder using Duhamel theorem", *Int. J Thermophysics*, 34: 350-365, (2013)
- Orcan Y., "Thermal stresses in a heat generating elastic-plastic cylinder with free ends", *Int J Eng Sci*, 32: 883 – 898, (1994)
- Orcan Y., "Residual stresses and secondary plastic flow in a heat generating elastic-plastic cylinder with free ends", *Int J Eng Sci*, 33: 1689 – 1698, (1995)
- Arslan E., Mack W., Eraslan A.N., "Effect of a temperature cycle on a rotating elastic-plastic shaft", *Acta Mech*, 195: 129-140, (2008)
- Eraslan A.N., Orcan Y., "Computation of transient thermal stresses in elastic-plastic tubes: Effect of coupling and temperature-dependent physical properties", *J Therm Stresses*, 25: 559-572, (2002)
- Deshmukh K.C., Warbhe S.D., Kulkarni V.S. "Brief note on heat flow with arbitrary heating rates in a hollow cylinder", *Therm. Sci.*, 15 (1): 275-280, (2011)
- Bhongade C.M., Durge M.H., "Transient thermal stresses due to instantaneous internal heat generation in a thin hollow cylinder", *Int J Math and Stat Invent (IJMSI)*, 2 (3): 83-88, (2014)
- Eraslan A.N., Apatay T., "Thermoelastic stresses in a rod subjected to periodic boundary condition: An analytical treatment", *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*, 2 (9): 2438-2444, (2015)
- Walde R.T., Pathak A.C., Khobragade N.W., "Thermal stresses of a solid cylinder with internal heat source", *Int J Eng and Innovative Tech (IJEIT)*, 3 (1): 407-410, (2013)
- Eraslan A.N., Varli E., "Elastic Response of a Heat Generating Rod at a Variable Generation Rate", *Proceedings of 12th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM)*, vol 1648, Rhodes, Greece, (2014)
- Mendelson A. "Plasticity: Theory and Application", *The Macmillan Company*, New York, (1968)

Ev Tipi Olarak Tasarlanmış Bir CNG Kompresör Prototipinin Performans ve Çalışma Parametrelerinin İncelenmesi

Battal DOĞAN

Kırıkkale Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kırıkkale
(Geliş / Received : 27.01.2016 ; Kabul / Accepted : 30.03.2016)

ÖZ

Günümüzde ticari amaçlı yük ve yolcu taşımada kullanılan araçlarda çevre kirliliği azaltmak ve yakıt ekonomisinin sağlanması açısından enerji kaynağı olarak doğal gaz kullanılmaktadır. Hususi araçlar içinde doğal gaz kullanımı yaygınlaşmaktadır. Bu araçlarda yakıt dolumu için istasyonlarda yüksek basınçlı doğal gaz (CNG) kompresörü kullanılmaktadır. Araçların dolum yaptığı merkezlerde bulunan CNG kompresörler şehir şebekesinden aldıkları doğal gazı 200-250 bar basınçta CNG tanklarına doldurmakta ve tanklardan araçların deposuna iletilmektedir. Bu çalışmada tasarımı ve imalatı yapılan 4 pistonlu CNG kompresör prototipi şehir içi şebeke hattından 0.022 bar basınçla alınan doğal gazı 200 bar basınçlara sıkıştırılmaktadır. İmalatı yapılan kompresörün debi ve basınç testleri yapılarak sonuçlar kısmında verilmiştir. Ayrıca CNG kompresörünün enerji performans testleri ve hesaplamaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: CNG, Kompresör, Enerji

Analysing the Performance and Working Parameters of A CNG Compressor Prototype Designed As A Household Type

ABSTRACT

Nowadays, the natural gas has been used as energy resource to decrease environment pollution and support fuel economy in the vehicles, which are used in commercial load and passenger transport. Using natural gas has become prevalent in private vehicles. In this vehicles, high pressure natural gas compressor are used to fuel up in the station. CNG compressor, which is located in the center of filling up the vehicles, fill up natural gas to the CNG tank at 200-250 bar pressure, which is taken to the inner city lines, and natural gas has been transmitted from tanks to the storage of vehicles. In this study, the four-piston CNG compressor prototype that is designed and manufactured has been compressing the natural gas, which has been taken with a 0.022 bar pressure from the inner-city lines into 200 bar pressure. The pressure and flow tests of compressor that is manufactured have been given at result section. Moreover, energy performance tests and calculations of CNG compressor has been made.

Key Words: CNG, Compressor, Energy

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de yolcu ve yük taşımada kullanılan araçlar çevreyi kirletmekte ve petrol fiyatlarının yüksek olması nedeniyle ekonomiye ağır yük getirmektedir. Bu nedenle alternatif yakıt kullanımı teşvik edilmelidir. Petrole alternatif yakıt olarak kullanılan CNG hem ekonomik hem de çevreci bir yakıttır. CNG kullanan araçlar atmosfere dizel araçlardan 22 kat daha az karbon monoksit salmakta ve daha sessiz çalışıp gürültü kirliliğini azaltmaktadır. Dünyada devlet teşviklerinin az olması ve alt yapı eksiklikleri bulunması nedeniyle doğal gazlı motora sahip araçlar tüketici ve filo şirketleri tarafından daha az tercih edilmektedir [1-3]. Yapılan araştırmalar CNG altyapısı ve yakıt ikmali probleminin

çözülmesi durumunda pazarın daha fazla genişleyeceğini göstermektedir [3-5].

CNG kullanan araçların deposunun doldurulmasında 200-250 bar gibi yüksek basınçlara çıkabilen yüksek basınçlı gaz kompresörleri gerekmektedir. Bu nedenle yüksek basınçlı CNG kompresörlerde en önemli tasarım kriteri basınçtır. Giriş basıncı ile çıkış basıncı arasındaki fark kademe sayısını ve soğutma sistemini belirlemektedir [6-7]. Kompresör tasarımında kademe sayısı akışkanın soğutulması açısından önemlidir. Genellikle CNG kompresörleri 3 veya 4 kademeli tasarlanır [8]. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus kompresörde bulunan silindir sayısı her zaman kademe sayısı ile aynı olmayabilir. Kademe sayısı kompresörün debisi ile ilişkilidir [9]. CNG kompresöründe debi dolmuş süresini ve performansı etkilemektedir [10]. Bir CNG kompresörü tasarlanırken basınç debi ve kademe sayısı yapılan hesaplamalarla belirlenir. Hesaplamalar-

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: btldgn@gmail.com

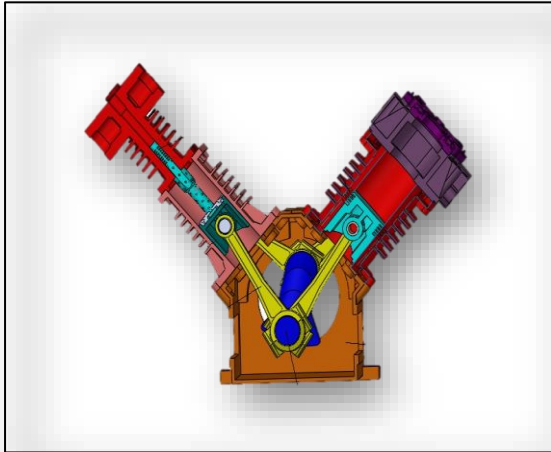
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 427-431

dan sonra imalat çizimleri ve malzeme seçimleri tamamlanır. Kompresörde gövde, krank ve silindirler hassas parçalardır [11]. Döküm işlemi yapıldıktan sonra parçalar hassas tezgâhlarda işleme tabi tutulur. Montaj işleminden sonra deneme ve testler yapılır. Çalışmada imalatı yapılan kompresörün ülkemizde herhangi bir üretimi bulunmamaktadır. Büyük şehirlerde CNG kullanan şehir içi otobüslerinin doğalgaz yakıt teminini sağlayan CNG kompresörleri mevcuttur. Bu kompresörlerin debileri çok yüksektir. Çalışmada imalatı yapılan ev tipi kompresör belediyelerin kullandığı büyük debili makinelerle karşılaştırmak uygun değildir.

Bu çalışmada elektrik motorundan güç sağlayan 200 bar basınçta çalışan 4 kademeli bir CNG kompresör prototipin tasarım ve imalatı yapılmıştır. Değişik şartlarda testler gerçekleştirilmiş ve basınç, debi ve enerji tüketimine ait sonuçlar verilmiştir. Doğal gaz ile yapılan sıkıştırma işleminde genellikle dolum yapılan depoların belirli bir kritik basınç değerinde tutulmasının gerektiği belirlenmiştir.

2. TASARIM VE İMALAT (DESIGN AND MANUFACTURING)

CNG yüksek basınç değerlerinde sıkıştırıldığı için pistonlu kompresörler daha verimli çalışmaktadır. CNG sıkıştırılırken doğalgazın kompresöre giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı yüksektir. Bu yüksek basınç farkını pistonlu tip kompresörlerle sağlamak soğutma açısından da önem arz etmektedir. Bu nedenle çalışmada Şekil 1’de kesiti verilen 4 kademeli pistonlu kompresör imal edilmiştir.



Şekil 1. CNG kompresör prototipinin kesit görüntüsü (CNG compressors prototype sectional view)

Şekil 1’deki kompresör 18.5 kW güçte elektrik motorundan hareket enerjisini alarak krankın dönmesini sağlamaktadır. Biyel kolları pistonların emme ve basma işlemlerini yapmasını sağlayarak gazı sıkıştırmaktadır. Prototipte 1. ve 2. kademelerin bulunduğu silindir gövdesi ile 3. ve 4. kademelerin buldukları silindir gövdeleri arasındaki açı 90° olacak şekilde ayarlanmıştır. Debinin ayarlanmasındaki en önemli etmenlerden biri olan devir sayısının artması yüksek sıcaklık değerlerini beraberinde getirmekte, soğutma ihtiyacı artmaktadır.

Ticari amaçlı olarak kullanılan kompresörlerde devir sayıları yüksek tutulur ve artan sıcaklığa karşı su ve soğutucu akışkan kullanılarak soğutma sağlanır. Ancak ticari amaçlı olmayan kompresörler için zaman sıkıntısı olmadığı için düşük devir sayılarında dolayısı ile düşük debide gaz sıkıştırma işlemi yapılabilir. Prototip şekil 2 verildiği gibi krank-biyel mekanizma grubu, piston ve silindir grupları, gaz emme ve basma grupları, soğutma grubu, elektrik aksamından oluşmaktadır.

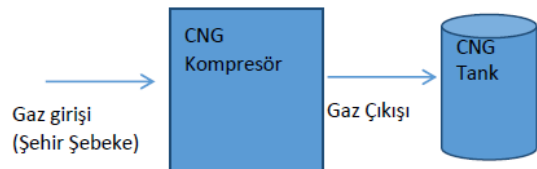


Şekil 2. Prototip şasesi montaj resmi (The prototype chassis assembly drawing)

Tasarım aşamasında kompresörün istenilen basınç değerlerine çıkabilmesinin yanında meydana gelebilecek deformasyonları önleyebilecek dayanıma da sahip olması önemlidir. Bu parametreler göz önüne alınarak sistemin optimum şartlarda çalışabilmesi için, radyatör vasıtası ile kademeler arasında doğal gazın soğutulması sağlanmıştır. Yapılan hesaplamalar ve analiz çalışmaları ile kompresörde bulunan önemli parçaların birçoğu standart ölçüler dışında olan parçalardır. Bu nedenle bütün parçalar için özel döküm kalıpları hazırlanmıştır.

3. PERFORMANS TESTLERİ (PERFORMANCE TESTS)

İmalatı yapılan CNG kompresörü test sırasında 21 mbar basıncında olan doğal gazı şehir içi şebeke hattından alıp 200 bar basınca çıkarmıştır. Şekil 3’de akış diyagramı verilen deney düzeneğinde basınçlı gazın depolanması için 60 litre hacimli bir CNG tankı kullanılmıştır.



Şekil 3. Test akış şeması (Test flow chart)

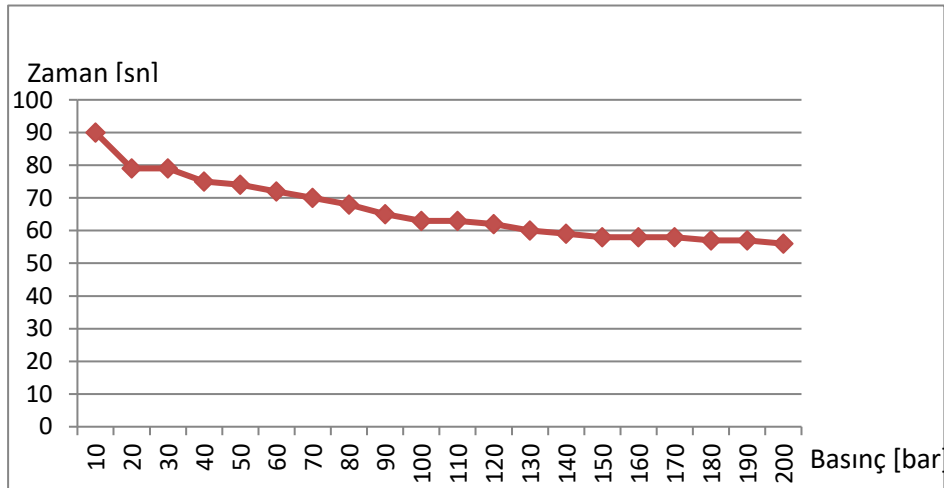
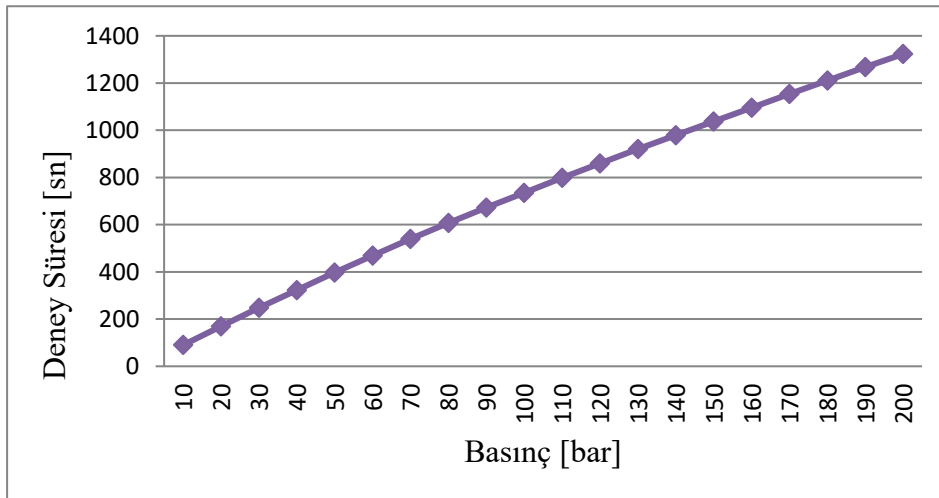
Deney esnasında değerlendirme kolaylığı sağlanması amacıyla tanktaki her 10 bar gaz basınç artımları arasında geçen süreler ölçülmüştür. Kompresörün sıkıştırılan gazı tanka basması ile birlikte her bir ölçüm için geçen süreler Çizelge 1’ de detaylı olarak belirtilmiştir.

Çizelge 1. Deney basınç ve süre ölçümleri (Experimental measurements of pressure and time)

	Gaz Stok Basıncı [bar]	Geçen Süre [sn]
1.Ölçüm	10	90
2.Ölçüm	20	79
3.Ölçüm	30	79
4.Ölçüm	40	75
5.Ölçüm	50	74
6.Ölçüm	60	72
7.Ölçüm	70	70
8.Ölçüm	80	68
9.Ölçüm	90	65
10.Ölçüm	100	63
11.Ölçüm	110	63
12.Ölçüm	120	62
13.Ölçüm	130	60
14.Ölçüm	140	59
15.Ölçüm	150	58
16.Ölçüm	160	58
17.Ölçüm	170	58
18.Ölçüm	180	57
19.Ölçüm	190	57
20.Ölçüm	200	56

Deneyde kompresörün tanka bastığı gaz basıncı 200 bar seviyesine gelince durdurulmuştur Ölçüm sonuçları şekil 4’de grafik halinde verilmiştir. Deney esnasında her 10 barlık artışlar arasında geçen süreler incelendiğinde 0 bar başlangıç değerinden 10 bar ilk değerine kadar geçen süre 90 sn iken, 190 bar dan 200 bar değerine ulaşması için geçen süre 56-57 saniye olarak ölçülmüştür. Kompresör çalışırken basınç değeri yükseldikçe her 10 barlık sıkıştırma için geçen sürelerde azalma olduğu gözlemlenmiştir. Kompresörün 80-100 bar değerlerine ulaşana kadar her 10 barlık değerler arasında geçen süreler yüksek değerler olurken; 100 bar değerinden sonra bu farklar düşük oranlarda kalmıştır. Bu kompresörün belirli bir dengelenme noktasında geldiğini ve 10 barlık sıkıştırma sürelerinin belirli bir sabit değere ulaşmaya başladığını göstermektedir. 120-200 bar değerlerinde kompresörün 10 bar değer artışlarında süreler azalmaya devam etmiştir. Kompresörün 120 bar basınç sonrası dengeli bir şekilde tanka dolum yaptığı görülmektedir.

Kompresör deney sonuçları incelendiğinde şekil 5’den anlaşılacağı gibi kompresörün 60 L lik CNG tankını 20-25 dakikada doldurduğu ve 200 bar basınç değerine çıkardığı görülmektedir. Prototipin soğutma sistemi ve

**Şekil 4.** Basınç-zaman grafiği (Pressure-time graph)**Şekil 5.** Deney süresince basınç değişimi (During the experiment the pressure change)

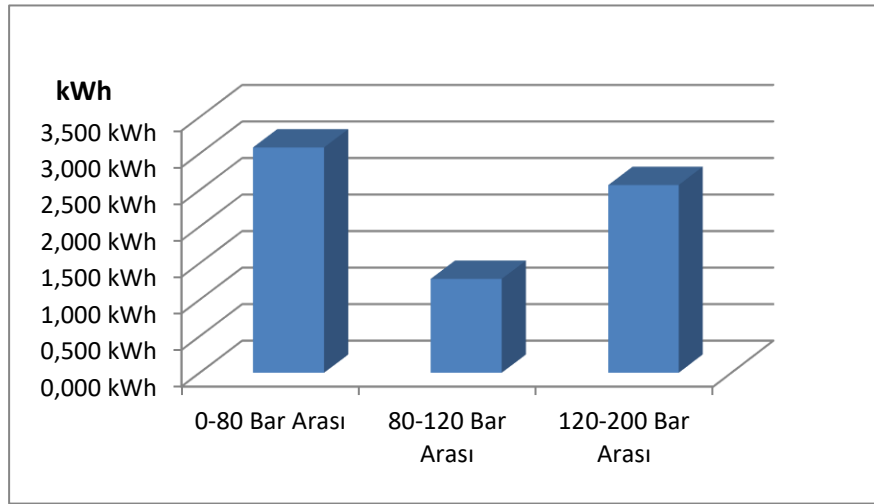
malzeme dayanımları geliştirilerek, yüksek devir şartlarında daha kısa sürede dolun yapılabilmesine imkan sağlanabilir.

Deney süresince meydana gelen enerji tüketimi miktarları şekil 6'da verilmiştir. Kompresördeki elektrik motoru 18,5 kJ/s olduğu dikkate alınarak kompresördeki çalışma sırasındaki zaman aralıkları bu güç değeri ile çarpılarak maliyet hesaplanmıştır. Test süresince en çok enerji tüketimi 0-80 bar basınç değerleri arasında yaklaşık 3 kWh ile gerçekleşmiştir. Kompresör 80-120 bar değerleri arasında yaklaşık 1,285 kWh lik bir enerji harcarken; 120-200 bar değerleri arasında da 2,569 kWh enerji maliyeti bulunmaktadır. Yüksek kapasiteli CNG kompresörlerinde dengelenme süresine kadar olan enerji maliyeti, dengelenme sonrasındaki enerji maliyetinden düşük kalmaktadır. Prototip ile yapılan deney sonucunda bu durum yeniden teyit edilmiştir.

işleminde harcanan süre kompresörün ev tipi kompresör olması dolayısıyla ile çok iyi sayılabilecek bir süredir. Fakat ticari amaçlı kompresörler imalatlarında bu süreler olabildiğince kısaltılacak şekilde tasarımı yapılması daha uygun olacaktır.

Kompresör deney esnasında basınç, debi açısından incelenebilmiştir. Enerji maliyetleri analiz edilmiştir. Kompresörde bulunan basınç göstergeleri sayesinde her bir kademeye ait gaz basıncı anlık olarak görülebilmektedir. Bu sayede hem bir arıza durumunda problemin hangi kademede olduğunu anlamak adına hem de kompresörün kademelerinin istenilen basınç aralıklarında çalışıp çalışmadığını kontrol etmek adına da önemli bir yer tutmaktadır.

Literatürdeki bazı çalışmalar incelenmiş ve imalatı gerçekleştirilen kompresörün test sonuçları karşılaştırıl-

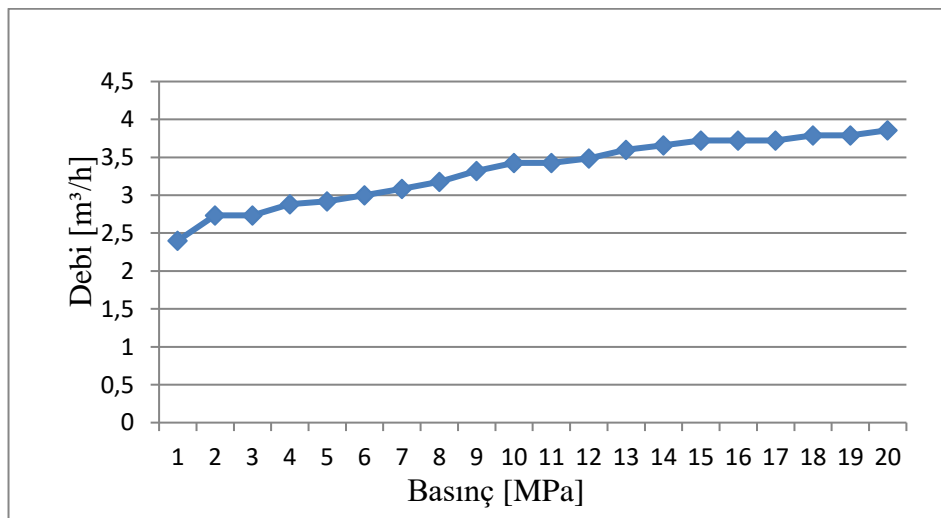


Şekil 6. Enerji tüketim miktarı (The amount of energy consumption)

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Çalışmada imalatı yapılan CNG kompresör prototipi bir CNG tankını 200 bar basınçta doldurmaktadır. Bu dolun

muştur. Test sonuçları karşılaştırıldığında [9] dolun sırasında basınç artarken belirli değerler arasında dengelenme olduğu görülmektedir. Testleri yapılan prototipin basınç-debi ilişkisini veren grafik şekil 7'de



Şekil 7. Prototip için debi-basınç ilişkisi (Flow-pressure relationship for prototype)

verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde 10-12 MPa değerlerinde bir dengelenme süreci meydana gelmiştir. Literatür çalışmaları [10] incelendiğinde doğalgaz sıkıştırma işleminde kritik bir basınç değerinde dengelenmenin başladığı görülmektedir.

Bu sebeple CNG tanklarına dolum yapılırken bu kritik noktalar göz önüne alınarak, tanktaki gaz basınç miktarının belirli bir seviyenin altına düşmemesi istenmektedir. Bu sayede dengelenme için geçen süre daha düşük olmakta ve enerji maliyetini azalmaktadır.

CNG kompresörleri artan enerji maliyetleri ve çevre kirliliği sorununun önüne geçecek temiz ve tasarruflu enerji olmasından dolayı güncelliğini koruyan bir konudur. Bu çalışma literatürde bulunan CNG kompresörleri konusundaki eksikliğin de giderilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada literatürde bulunan diğer çalışmalardan farklı olarak bir CNG kompresörünün tasarımı ve imalat aşamalarının tamamına yer verilmiş, CNG kompresörleri bileşenleri ve imalat aşamaları detaylı olarak anlatılmıştır. Kompresörün imalatı gerçekleştirilerek bu kompresörün CNG tankına gaz dolumu deney çalışmaları yapılmıştır. İmalatı yapılan kompresör ev tipi olması sebebi ile yüksek basınç ve düşük debi ile çalışan bir kompresörün çalışma parametrelerinin incelenmesi sağlanmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1- Wegrzyn J., Gurevich M., "Adsorbent storage of natural gas", *Applied Energy*, 55: 71–83, (1996).
- 2- Xueqiang F., Liangsheng G., Xiancai F., Yongzhang Yu "A New Type Of CNG Refueling System and Equipment" *International Compressor Engineering Conference at Purdue*, July 14-17, (2008).
- 3- Cao W., Lu X-S, Lin W., Gu A., "Parameter comparison of two small-scale natural gas liquefaction processes in skid-mounted packages", *Applied Thermal Engineering*, 26(8–9): 898–890, (2006).
- 4- Xuping Li., Ogden Joan M., Kurani Kenneth S., "An overview of automotive home and neighborhood refueling", *EVS24 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, Stavanger, Norway, May 13–16, (2009).
- 5- Koga T., "High Pressure, High Standarts: High Pressure Screw Gas Compressors", *Hydrocarbon Engineering*, 14(2): 73-78, (2009).
- 6- Reuss, N., Mundt C., "Experimental Investigations of Pressure Distorsions on the High Pressure Compressor Operating Behavior", *Journal of Propulsion and Power*, 25: 653-667, (2009).
- 7- Zheng XQ, Zhang YJ, Yang MY, "Research and Development on Transonic Compressor of High Pressure Ratio Turbocharger for Vehicle Internal Combustion Engines", *Science China-Technological Sciences*, 53: 1817-1823, (2010).
- 8- Kern, M., Horn, W., Hiller, S.J., Staudacher, S., "Effect of Tip Injection on the Performance of a Multi-Stage High-Pressure Compressor", *Ceas Aeronautical Journal*, 2(1-4): 99-110, (2011).
- 9- Bidant, Y., Baumann, U., "Improving the Design of a High Pressure Casing with the Help of Finite Element Analysis to Ensure the Rotor Dynamic Stability of High Pressure Centrifugal Compressor Equipped with a Hole Pattern Seal", *Journal of Engineering For Gas Turbines and Power-Transactions of The Asme*, 133, (2011).
- 10- Droscher P., Sattler M., Laxander A., "Dry Gas Seals For High-Pressure gas Injection Compressors Used in High-Pressure Service for Gas Injection", *Pipeline and Gas Journal*, 238: 61-63, (2011).
- 11- Ünal İ., Doğan B. "Yüksek Basıncılı Gaz Kompresörlerinin Çalışma Parametrelerinin Deneysel İncelenmesi", *Mühendis Makine Dergisi*, (2014).

AISI 304 Paslanmaz Çeliğinin Frezelenmesinde Farklı Kaplama Malzemelerinin Takım Aşınmasına, Kesme Kuvvetlerine ve Yüzey Pürüzlülüğüne Etkileri

Emel KURAM*

Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 41400, Gebze, Kocaeli
(Geliş / Received : 24.01.2016 ; Kabul / Accepted : 15.06.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin frezelenmesinde farklı kaplanmış kesici takımların performansı deneysel araştırılmıştır. Testlerde tek katlı TiCN, AlTiN, TiAlN ve iki katlı TiCN + TiN ve AlTiN + TiN olmak üzere 5 farklı kaplamaya sahip sementit karbür takma uçlar seçilmiş ve bu takımlar takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü baz alınarak değerlendirilmiştir. TiCN + TiN kaplanmış kesici uçlar en düşük serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini vermiştir. En yüksek takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ise AlTiN kaplamalı kesici uçlar ile elde edilmiştir. En düşük Fx ve Fy kuvvetleri TiAlN kaplamalı kesici uçlar ile ölçülmüştür. EDX analizi sonucunda kesici uçlarda yapışma olduğu ve kaplamanın kalktığı gözlenmiştir. AISI 304 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde en kötü performansı AlTiN kaplanmış uçlar göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 304, frezeleme, takım kaplaması, takım aşınması, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü

Effects of Different Coating Materials on Tool Wear, Cutting Forces and Surface Roughness in Milling of

ABSTRACT

In this study, the performance of various coated cutting tools were investigated experimentally in milling of AISI 304 stainless steel. Five cementit carbide inserts with various coating such as monolayer TiCN, AlTiN, TiAlN and two layers TiCN + TiN and AlTiN + TiN were selected in the tests and these tools were evaluated by tool wear, cutting forces and surface roughness. TiCN + TiN coated cutting inserts gave the lowest flank wear and surface roughness values. The highest tool wear and surface roughness values were obtained with AlTiN coated cutting inserts. The lowest Fx and Fy forces were measured with TiAlN coated cutting inserts. Adhesion and coating delamination on the cutting inserts were observed with EDX analysis. AlTiN coated inserts showed the worst performance during milling of AISI 304 stainless steel.

Keywords: AISI 304, milling, tool coating, tool wear, cutting forces, surface roughness

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

AISI 304 paslanmaz çeliği yüksek deformasyon sertleşmesi, düşük ısı iletkenliği ve yüksek korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle uzay ve havacılık alanında yaygın olarak tercih edilmektedir. Fakat bu malzemenin talaşlı imalatı esnasında takım-iş parçası ara yüzeyinde oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle operatörler takımında ani kırılmalar ve düşük yüzey kalitesi ile karşılaşmaktadır [1]. Kesici takım kaplamaları, takım-talaş ara yüzeyinde meydana gelen sürtünmeyi azaltarak takım ömrünü artırabilir ve işleme performansını iyileştirebilir. Bu nedenle, farklı kesici takım kaplama uygulamaları talaşlı imalat alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Farklı kaplama uygulamalarının paslanmaz çelik malzemesinin talaş kaldırılarak işlenmesinde performansları literatürde araştırılmıştır. Biermann vd. X5CrNi18-10 östenitik paslanmaz çeliğinin mikro frezelenmesinde CrN, TiN, AlCrN, AlTiN ve TiAlN takım kaplamalarının

takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemiştir [2]. Ciftci AISI 304 ve AISI 316 östenitik paslanmaz çeliklerinin tornalanmasında TiC/TiCN/TiN ve TiCN/ TiC/Al₂O₃ kaplanmış sementit karbür kesici takım kullanmıştır [3]. Selinder vd. AISI 303/304 paslanmaz çeliklerinin frezelenmesinde fiziksel buhar biriktirme (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) yöntemleri ile kaplanmış farklı kaplamaların takım aşınması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Kaplamalar olarak PVD TiN/TaN, PVD TiCN, CVD TiCN, PVD TiAlN seçilmiştir [4]. Fernan-dez-Abia vd. AISI 304L paslanmaz çeliğinin tornalanmasında AlTiN, AlTiSiN, AlCrSiN ve TiAlCrN kaplamalı takımların takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemiştir [5]. Özer ve Bahçeci TiC+TiN, TiC kaplı sementit karbür, kaplamasız sementit karbür ve kübik bor nitrür (CBN) kesici takımların AISI 410 paslanmaz çeliğinin kuru tornalanmasındaki işlenebilirlik özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü bakımından TiC kaplı sementit karbür takım en düşük değerleri vermiştir [6]. Endrino vd. AISI 316 paslanmaz çelik malzemesinin frezelenmesinde PVD metodu ile

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: kuram@gtu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 433-443

AlCrN, AlCrNbN ve AlTiN kaplanmış kesici takımların takım aşınması üzerindeki etkisini çalışmışlardır [7]. Grzesik AISI 304 paslanmaz çeliğinin tornalanmasında TiC, TiC/TiN ve TiC/Al₂O₃/TiN kaplamalarının kesme sıcaklığına etkisini araştırmıştır [8]. Diğer çalışmasında Grzesik AISI 304 paslanmaz çeliğinin tornalanmasında TiC, TiC/TiN ve TiC/Al₂O₃/TiN kaplamalarının spesifik kesme basıncına ve kesme sıcaklığına etkisini incelemiştir [9]. Altınkaya ve Güllü AISI 316 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde TiAlN, TiN/TiCN/TiN ve TiN/TiCN/Al₂O₃ kaplanmış takımların aşınma üzerindeki etkisini incelemiştir [10].

Talaşlı imalatta işleme performansı kesme parametreleri, iş parçası malzemesi ve kesici takım kaplaması gibi koşullara bağlı olarak değişik şekillerde meydana gelen karmaşık bir olaydır. Bu çalışmanın amacı frezelemede farklı kaplama uygulamalarının işleme performansını nasıl etkilediğini deneysel olarak araştırmaktır. Bu nedenle bu çalışmada AISI 304 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde tek katlı TiCN, AlTiN, TiAlN ve iki katlı TiCN + TiN ve AlTiN + TiN kaplanmış takma uçların performansı; takım aşınması, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü dikkate alınarak tespit edilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

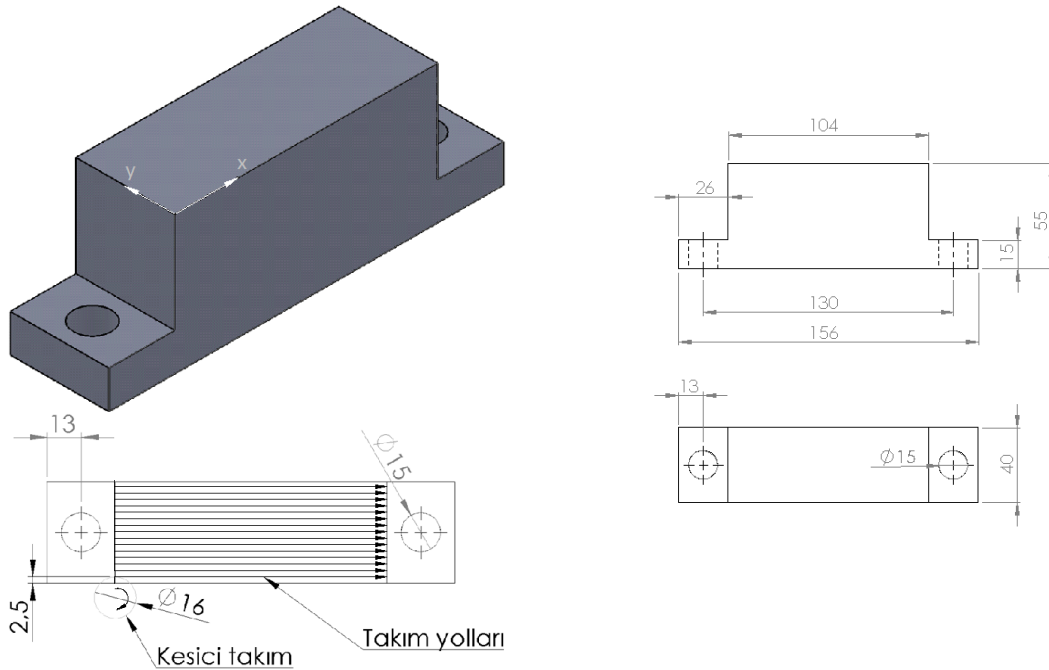
Frezeleme deneyleri DECKEL MAHO DMU 60 P CNC tezgahında yapılmıştır. İş parçası malzemesi olarak AISI 304 östenitik paslanmaz çelik tercih edilmiştir.

Malzemenin kimyasal bileşimi spektrometre cihazı ile tespit edilmiştir ve kimyasal bileşim değerleri Çizelge 1'de verilmiştir. İş parçasının boyutları Şekil 1'de verildiği gibi belirlenmiştir. Her bir kesici takım için 104 mm × 40 mm'lik yüzey aynı yönlü işleme metodu ile iki defa işlenmiştir. Kesici takım olarak farklı kaplama malzemesine sahip takma uçlar seçilmiştir. Kesici takımlar olarak tek katlı TiCN, TiAlN, AlTiN ve iki katlı TiCN + TiN ve AlTiN + TiN ile kaplanmış ticari uçlar tercih edilmiştir. Kaplamaların özellikleri Çizelge 2'de verilmiştir. Bütün takma uçlar benzer geometriye ve ölçülere sahiptir (APKT 1003PDR), sadece kaplama malzemesi farklıdır. Takma uçlar eşkenar üçgen şeklindedir ve 0,8 mm uç radyüsüne sahiptir. Takma uçlar 16 mm çapında üzerinde iki uç taşıyan bir takım tutucuya bağlanmıştır (Şekil 2). Deneyler sabit şartlar ve kuru kesme altında yapılmıştır (Çizelge 3). İşleme şartları takım üreticisinin tavsiyesi dikkate alınarak seçilmiştir.

Deneyler sonucunda kesici takımlarda meydana gelen aşınmalar taramalı elektron mikroskobu (SEM, Philips XL30) ile ölçülmüştür. Aşınma değeri olarak her iki ucun serbest yüzeyi üzerindeki en büyük aşınma değerleri tespit edilmiş ve analizlerde aşınma değerlerinin ortalaması alınmıştır. Ayrıca aşınmış kesici takımlardaki elementel analiz enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDX) ile yapılmıştır. Frezeleme esnasında meydana gelen kuvvetler 3-bileşenli bir tabla tipi dinamometre (Kistler, 9257B) ile ölçülmüştür. İşlenen yüzeylerin pürüzlülüğü Mitutoyo Surf Test 301 profilometre ile değerlendirilmiş ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra)

Çizelge1. İş parçası malzemesinin kimyasal içeriği (The chemical composition of workpiece material)

AISI 304 (% ağırlık)						
Cr	Ni	Mn	Cu	Si	Mo	Fe
18,75	8,23	1,89	0,69	0,64	0,40	69,10



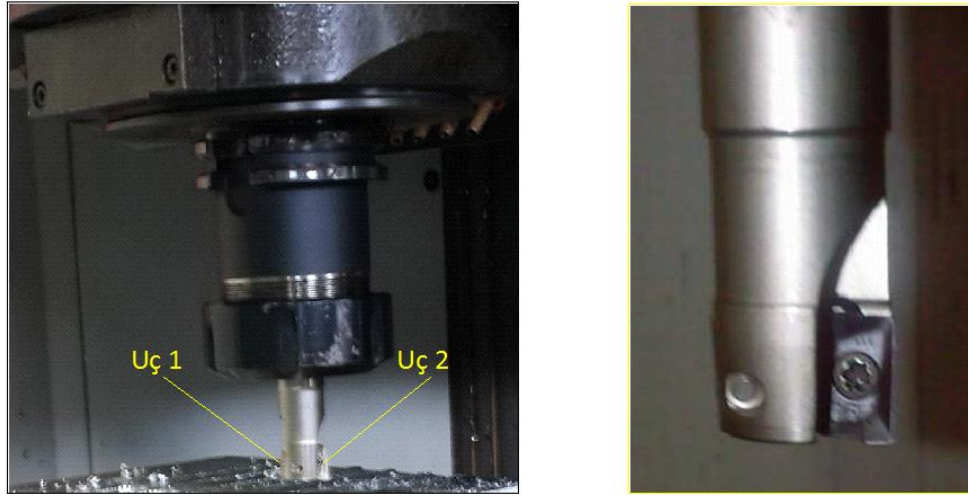
Şekil 1. Deneylerde kullanılan iş parçasının boyutları, tüm ölçüler mm dir (Dimensions of workpiece used at experiments, all dimensions are in mm)

dikkate alınmıştır. Ölçümlerde örnekleme uzunluğu 0,8 mm, örnekleme sayısı 5 olarak seçilmiştir. İş parçası yüzeyi üzerinde 4 farklı yerden Ra ölçümü yapılmış ve analizlerde bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

fazla aşınmasını sağlamaktadır. Kaplama malzemelerinin tümünde yapışma mekanizması nedeniyle AISI 304 malzeme kalıntıları uçlar üzerinde görülmüştür. Yapışma, özellikle AlTiN kaplanmış kesici uçta diğer uçlardakine nazaran daha fazla gerçekleşmiştir. Bunun

Çizelge 2 Kaplama özellikleri (Coating properties)

Kaplama Malzemeleri	Kaplama Metodu	Sürtünme Katsayısı	Sertlik (HV)
TiCN		0,50-0,55	3100
TiCN + TiN		0,40-0,45	3300
AlTiN + TiN	PVD	0,50-0,60	2900
AlTiN		0,60-0,70	2800
TiAlN		0,45-0,50	3000



Şekil 2. Takım tutucu ve kesici uçlar (Tool holder and cutting inserts)

Çizelge 3 Deney şartları (Experimental conditions)

Kaplama Malzemeleri	Yanal İlerleme (mm)	Kesme Hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Talaş Derinliği (mm)	Talaş Hacmi (cm ³ /dak)
TiCN					
TiCN + TiN					
AlTiN + TiN	2,5	200	0,3	0,8	2,388
AlTiN					
TiAlN					

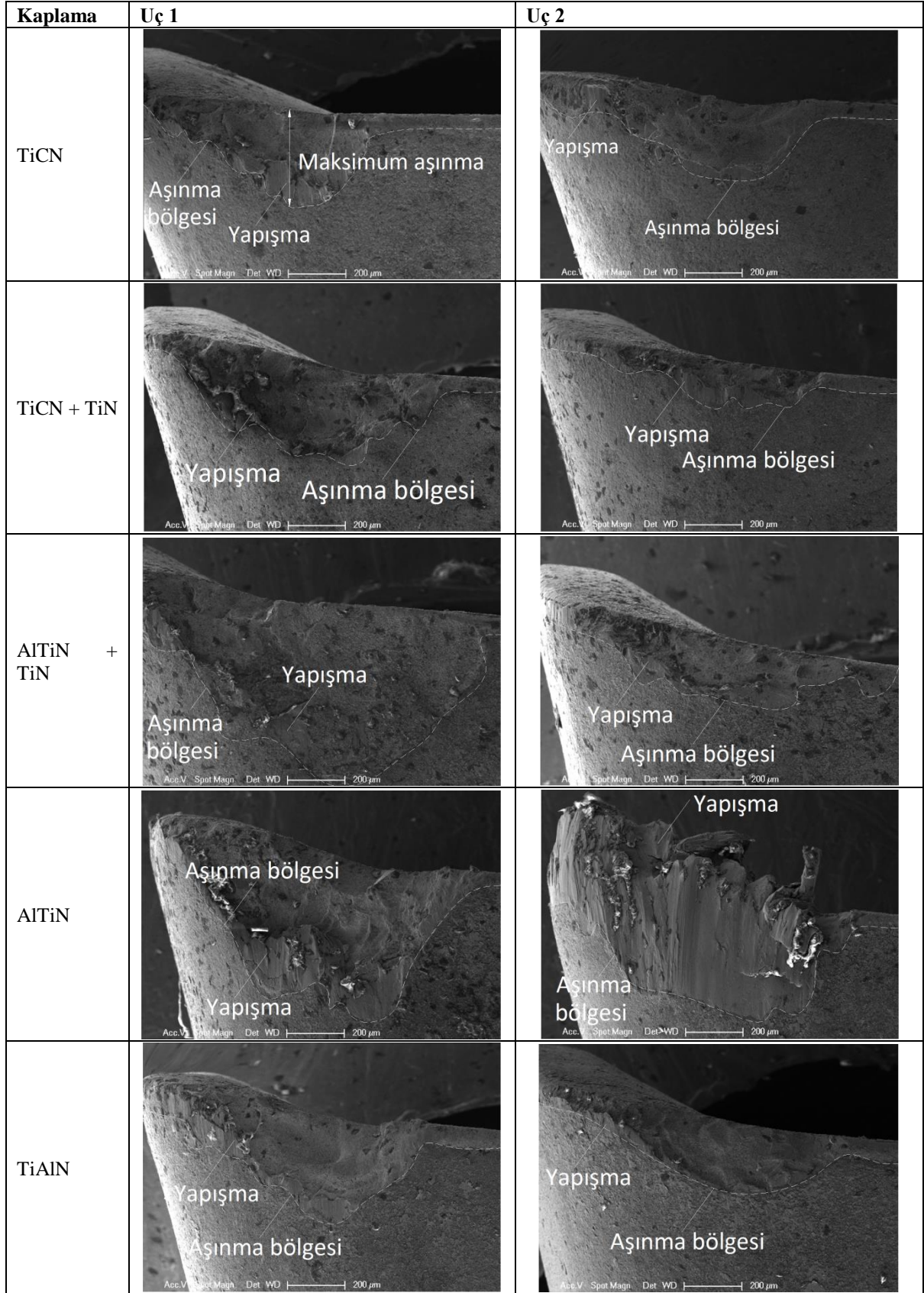
3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

(EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Takım Aşınması (Tool Wear)

Farklı kaplamalı kesici takımlar ile frezeleme işlemi sonucunda (2. pasonun sonunda) kesici uçların serbest yüzeyinin SEM görüntüleri Şekil 3'te verilmiştir. SEM görüntülerinden, Uç 1'in ve Uç 2'nin farklı aşınma değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Frezeleme işleminde bu durum takım salgısı nedeniyle beklenen bir sonuçtur [11]. Takım salgısı, kesici uçlardan birinin diğerine göre daha fazla talaş yüküne maruz kalmasına neden olmakta ve uçlardan birinin diğerine göre daha

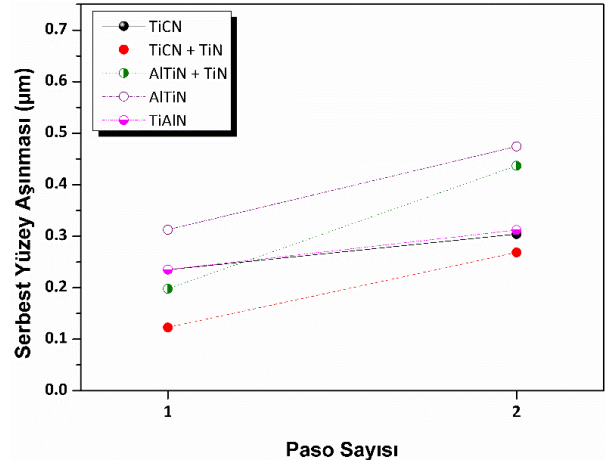
nedeni AlTiN kaplamalı ucun Çizelge 2'de verildiği gibi en büyük sürtünme katsayısına sahip olmasıdır. Yüksek sürtünme katsayısı frezeleme esnasında sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Artan sıcaklığın yapışma eğilimini arttırdığı da bilinmektedir. Tüm bu etkiler AlTiN kaplamalı ucun aşırı yapışmaya maruz kalmasını açıklamaktadır. En düşük serbest yüzey aşınması TiCN + TiN kaplanmış, en yüksek serbest yüzey aşınması ise AlTiN kaplanmış kesici uçlar ile gözlenmiştir. Kaplamalı uçlarda meydana gelen aşınma kaplama sertliği ile ilişkilidir. AlTiN kaplamalı takımın en yüksek aşınma değeri vermesinin nedeni düşük sertliğe sahip olmasıdır.



Şekil 3. Farklı kaplamalar için 2. paso sonunda serbest yüzeylerin SEM görüntüleri, büyüme 100× (SEM views of flank surfaces for different coatings at the end of 2nd pass, magnification 100×)

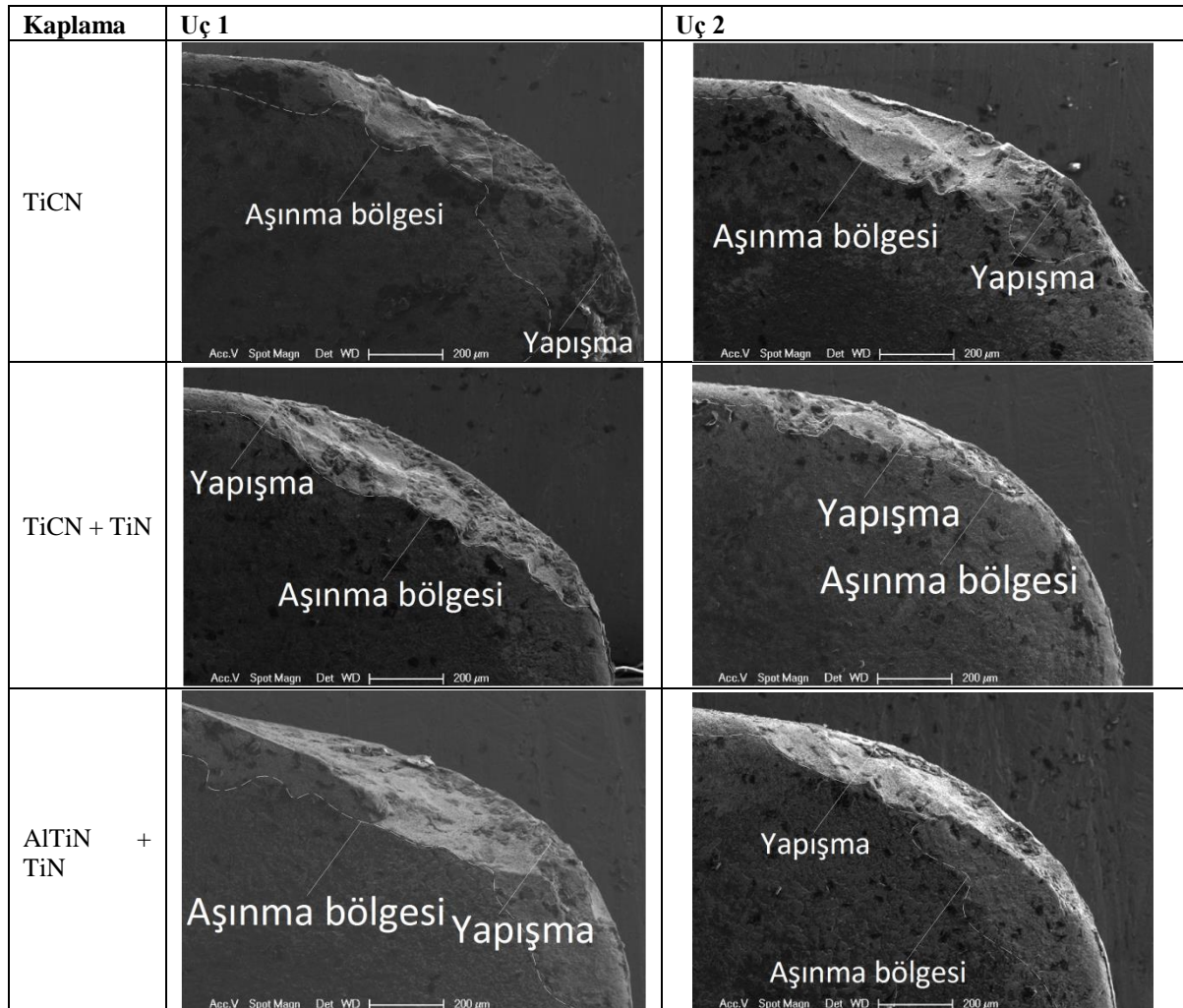
Bütün kaplama malzemeleri için serbest yüzey üzerinde oluşan en büyük aşınma değerleri ölçülmüştür ve sonuçlar Şekil 4'te sunulmuştur. En düşük serbest yüzey aşınması TiCN + TiN kaplanmış uç ile 0,12 mm olarak,

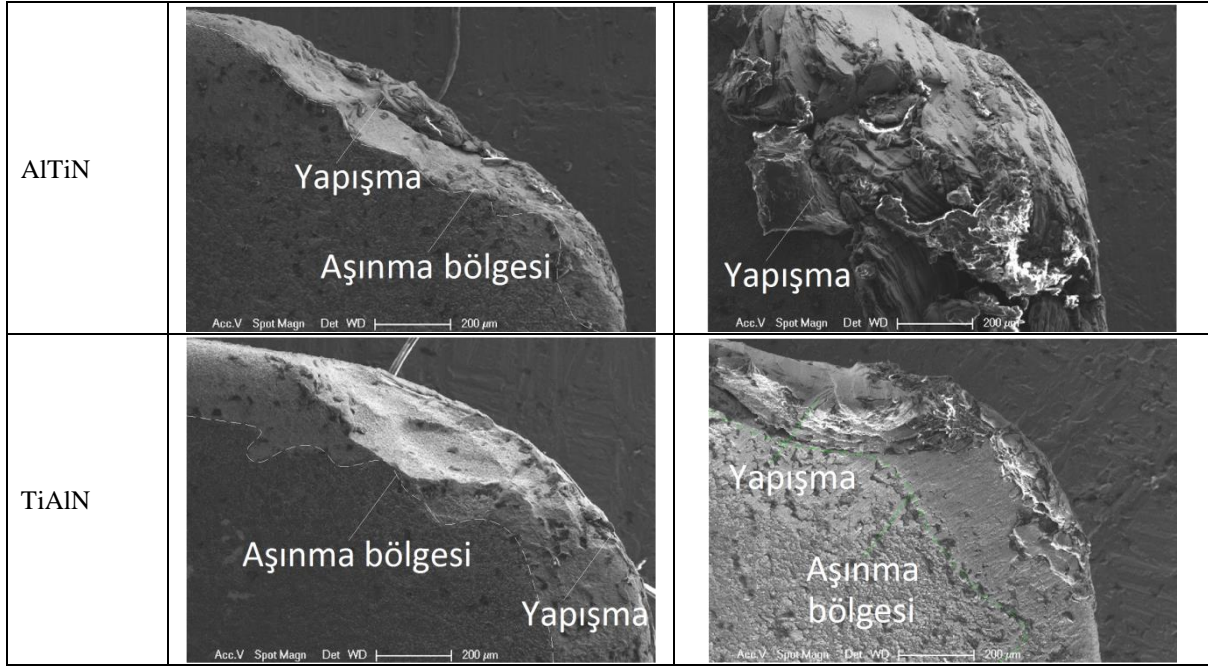
en yüksek aşınma ise AlTiN kaplanmış uç ile 0,47 mm olarak elde edilmiştir. 2. paso sonunda kesici uçlardaki serbest yüzey aşınması değerleri dikkate alındığında, kesici uç kaplamalarının performansının iyiden kötüye (en düşük aşınma değerinden en yüksek değere) TiCN + TiN, TiCN, TiAlN, AlTiN + TiN ve AlTiN şeklinde sıralandığı görülmüştür. TiCN + TiN kaplanmış kesici uçlar en yüksek aşınma değerini veren AlTiN kaplamaya göre aşınmayı %43,4 azaltmıştır. AlTiN kaplanmış kesici takımındaki aşınma değerinin TiAlN kaplanmış kesici takımındaki aşınma değerinden daha yüksek olduğu AISI 304 paslanmaz çeliğinin mikro frezelenmesinde de görülmüştür. Bu araştırmacılar bunun nedenini TiAlN kaplamanın AlTiN kaplamaya göre sertliğinin daha yüksek olmasına ve kaplama ile iş parçası malzemesi arasındaki düşük kimyasal tepkinin varlığına atfetmişlerdir [2]. Bu çalışmada kullanılan kesici uçların imalatçısına göre TiAlN kaplamanın sertliği çok yüksektir ve yaklaşık 3000 HV sertliğindedir. Yüksek sertlik aşınma direncini arttırmaktadır. Kaplama performansını etkileyen bir diğer faktör de sürtünme katsayısıdır. Yine takım imalatçısına göre TiCN ve TiAlN kaplamalı uçlar düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Düşük sürtünme katsayısı sürtünme kuvvetlerinin azalmasına neden olmaktadır [12].



Şekil 4. Farklı kaplamalar için serbest yüzey aşınması sonuçları (Flank wear results for different coatings)

Farklı kaplamalı kesici takımlar ile frezeleme işlemi sonucunda (2. pasonun sonunda) kesici uçların talaş yüzeyinin SEM görüntüleri Şekil 5'de verilmiştir. En fazla aşınmayı AlTiN kaplanmış kesici uç göstermiştir. Bu kaplamalı uçlarda, diğer uçlardakine nazaran aşırı yapışma ve kırılma gözlenmiştir.

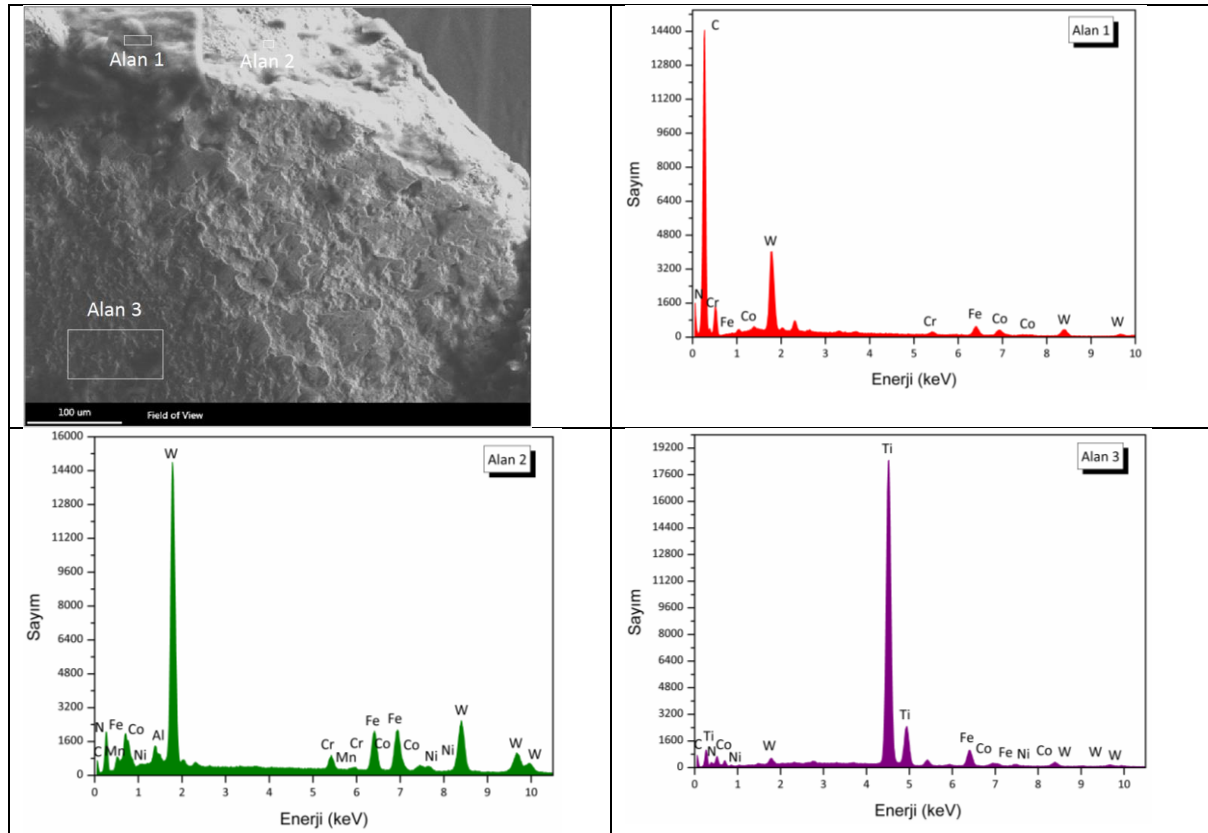




Şekil 5. Farklı kaplamalar için 2. paso sonunda talaş yüzeylerinin SEM görüntüleri, büyütme 100× (SEM views of rake surfaces for different coatings at the end of 2nd pass, magnification 100×)

Aşınmış takımların EDX analizi uçların talaş yüzeyi üzerinde yapılmıştır. TiCN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi Şekil 6'da verilmiştir. Alan 1'de

kalktığına kanıtıdır. Alan 3 ise aşınma tarafından etkilenmeyen bölgeden alınmıştır ve bu bölgede kaplama malzemesinin ana elementleri (Ti, C ve N) bulunmak-

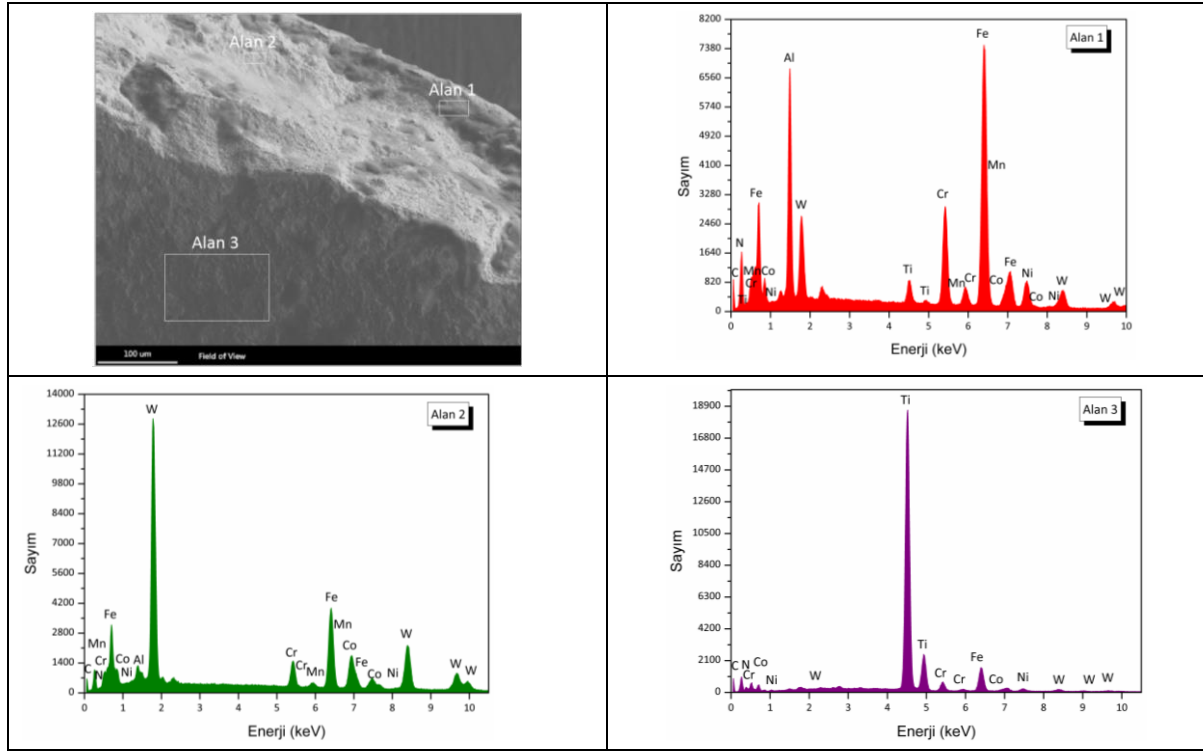


Şekil 6. TiCN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi (EDX analysis of rake face for TiCN coated insert 1)

C, Fe, Cr gibi elementlerin olması yapışmanın olduğunu göstermektedir. Bu elementler AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin ana bileşenlerindedir. Alan 2'de W elementinin varlığı bu bölgede TiCN kaplamanın

tadır.

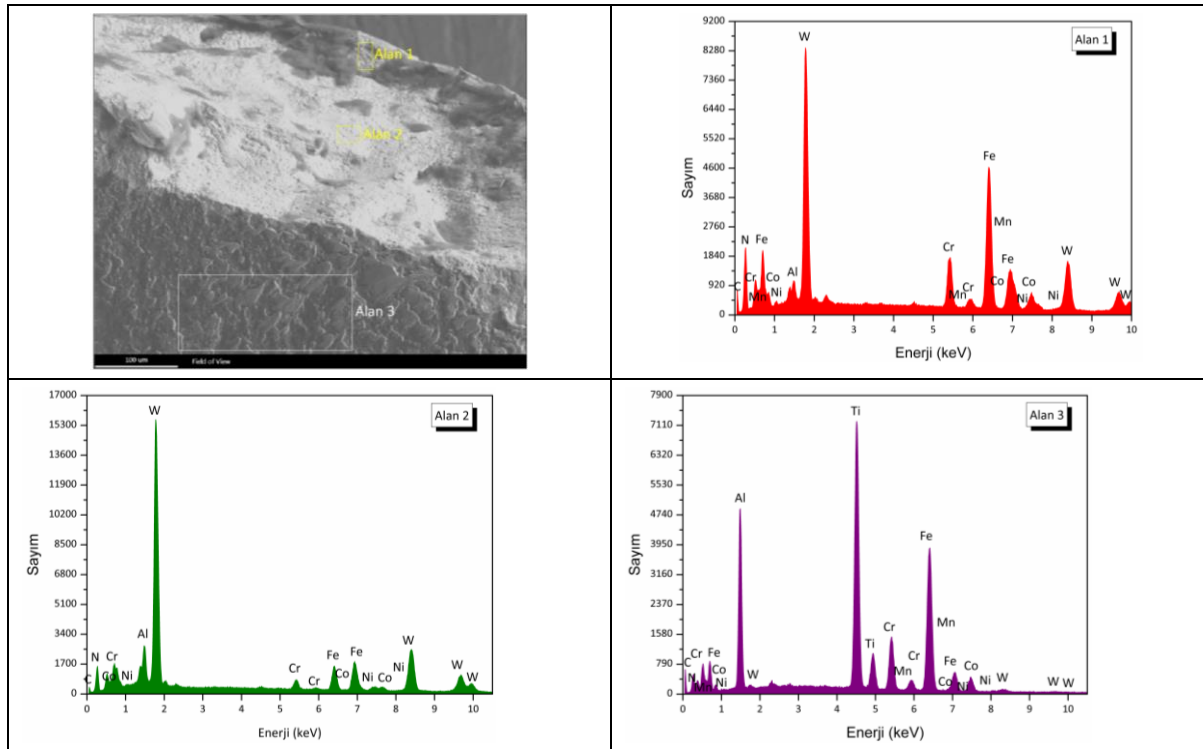
TiCN + TiN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi Şekil 7'de sunulmuştur. Alan 1'de iş parçasından



Şekil 7. TiCN+TiN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi (EDX analysis of rake face for TiCN+TiN coated insert 1)

gelen elementler bu bölgede yapışmanın olduğunu göstermektedir. Alan 2'de W elementinin olması bu

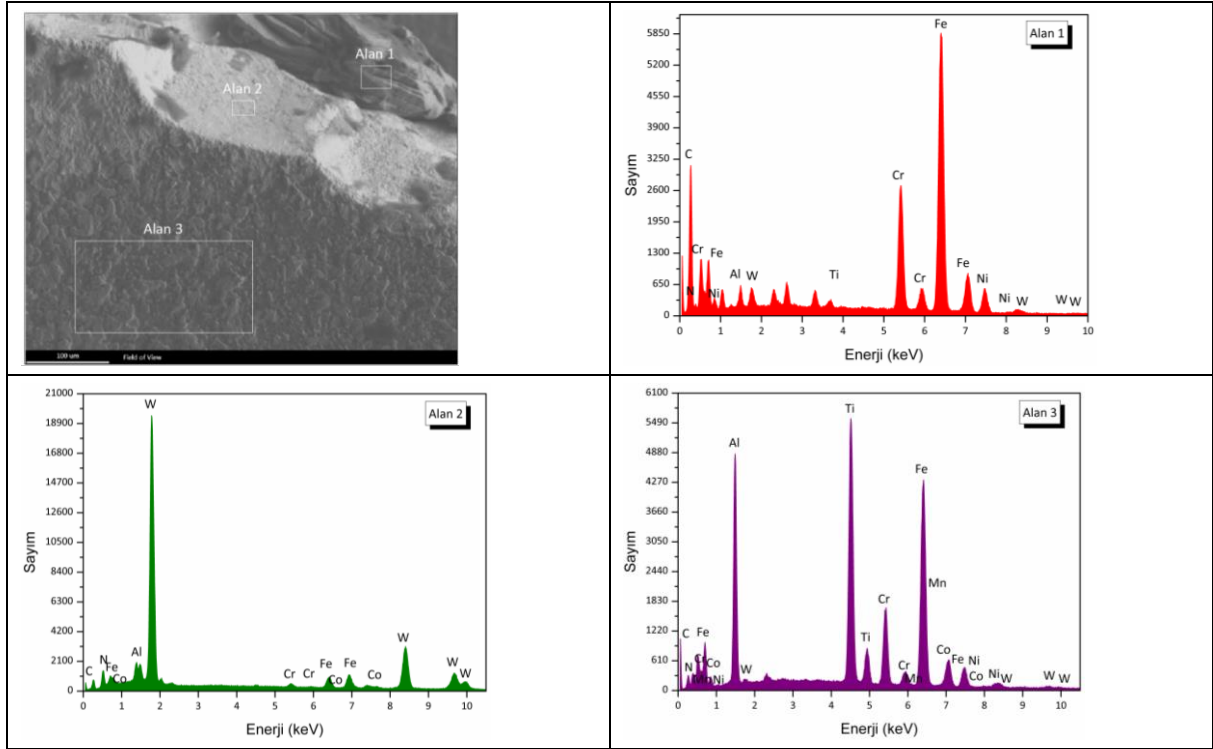
AlTiN + TiN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi Şekil 8'de gösterilmiştir. Alan 1'de iş parçasından



Şekil 8. AlTiN + TiN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi (EDX analysis of rake face for AlTiN + TiN coated insert 1)

bölgede kaplamanın kalktığının kanıtıdır. Alan 3'te kaplama malzemesinin ana elementleri (Ti, C ve N) bulunmaktadır.

gelen elementler bu bölgede yapışmanın olduğunu, W elementi ise kaplamanın kalktığının göstergesidir. Alan 2'de W elementinin olması bu bölgede kaplamanın kalktığının kanıtıdır. Alan 3 'te kaplama malzemesinin

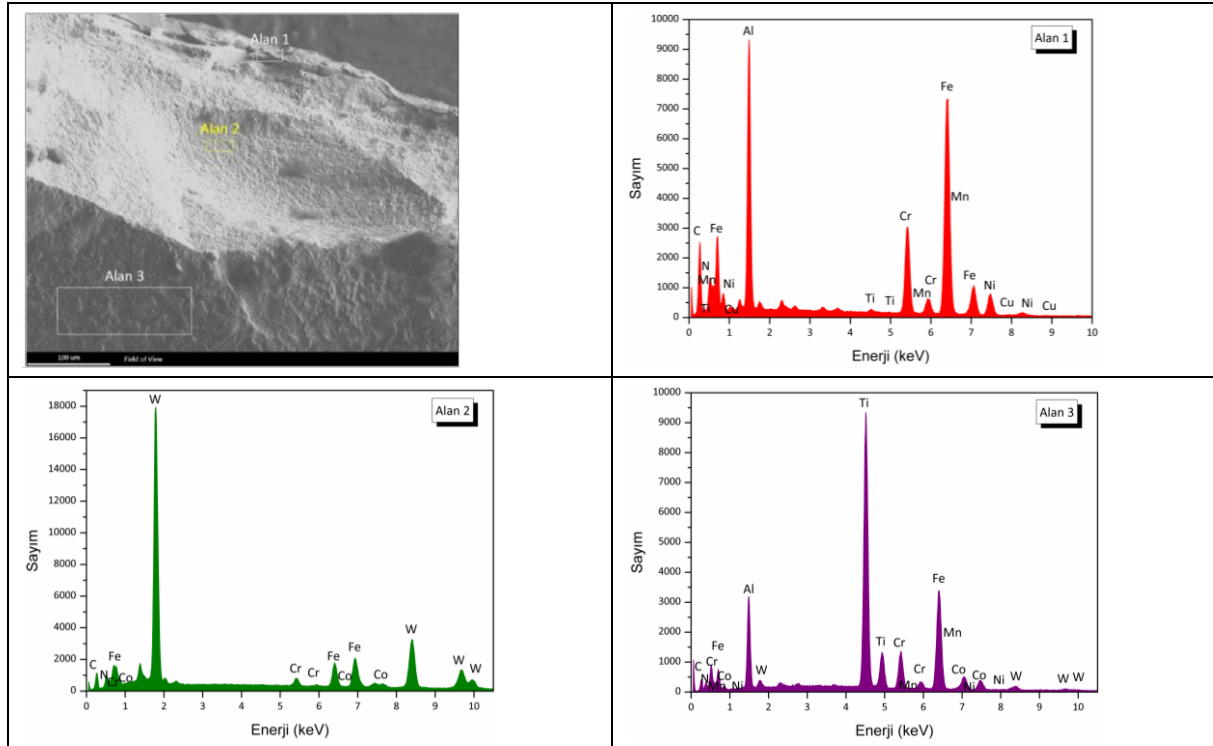


Şekil 9. AlTiN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi (EDX analysis of rake face for AlTiN coated insert 1)

ana elementleri (Al, Ti ve N) bulunmaktadır. Ayrıca alan 3'te yapışmanın göstergesi olan Fe, Cr, Ni gibi elementler de bulunmaktadır.

AlTiN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi Şekil 9'da gösterilmiştir. Alan 1'de iş parçasından gelen elementler bu bölgede yapışmanın olduğunu kanıtlar.

Alan 2'de W elementinin olması bu bölgede kaplamanın kalktığının göstergesidir. Alan 3'te kaplama malzemesinin ana elementleri (Al, Ti ve N) bulunmaktadır. Ayrıca alan 3'te yapışmanın göstergesi olan Fe, Cr, Ni gibi elementler de bulunmaktadır.

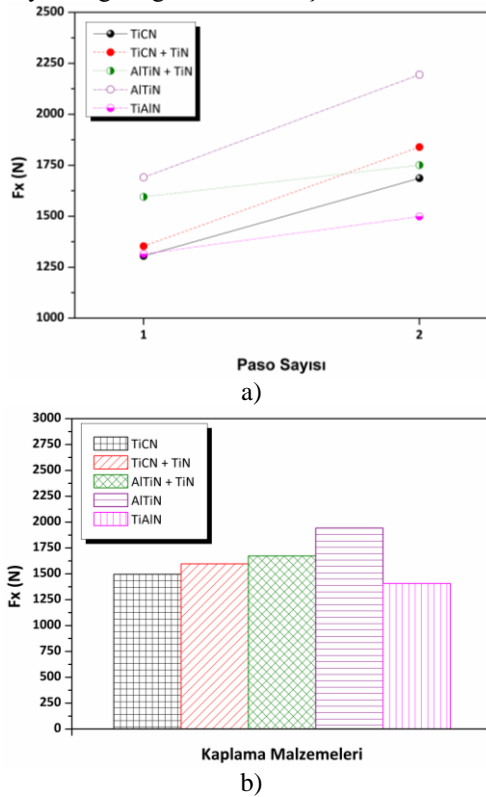


Şekil 10. TiAlN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi (EDX analysis of rake face for TiAlN coated insert 1)

TiAlN kaplanmış uç 1'in talaş yüzeyinin EDX analizi Şekil 10'da gösterilmiştir. Alan 1' de iş parçasından gelen elementler bu bölgede yapışmanın olduğunu kanıtlar. Alan 2'de W elementinin olması bu bölgede kaplamanın kalktığına göstergesidir. Alan 3'te kaplama malzemesinin ana elementleri (Ti, Al ve N) bulunmaktadır. Ayrıca alan 3'te yapışmanın göstergesi olan Fe, Cr, Ni gibi elementler de bulunmaktadır.

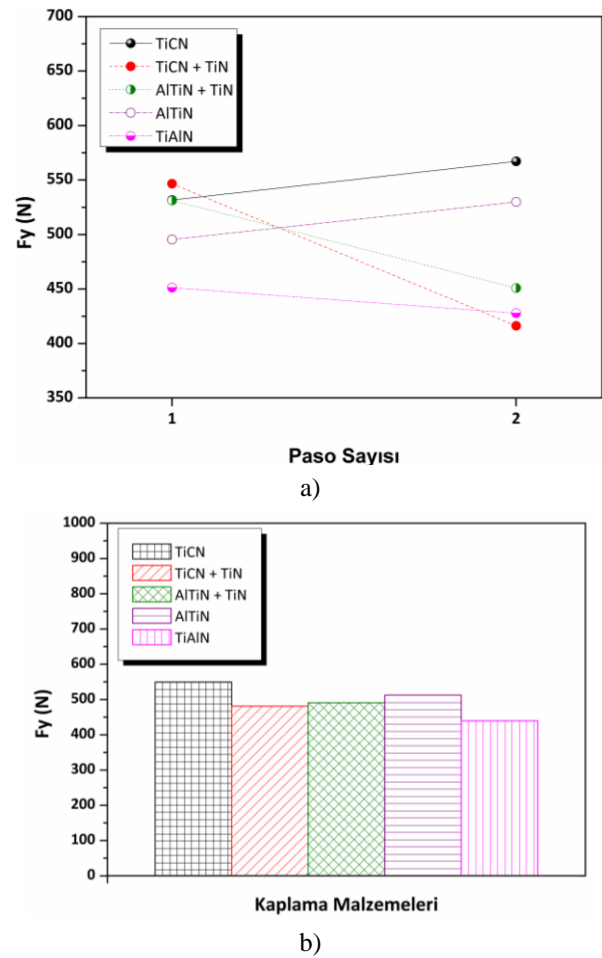
3.2. Kesme Kuvvetleri (Cutting Forces)

Farklı kaplama malzemeleri için Fx değerleri paso sayısına bağlı olarak Şekil 11a'da, iki pasonun ortalama Fx değerleri ise Şekil 11b'de verilmiştir. Şekil 11a'da görüldüğü gibi, ikinci pasoda daha yüksek Fx değeri elde edilmiştir. Paso sayısındaki artış ile Fx kuvvetindeki en büyük değişim, diğer uçlara nazaran AlTiN kaplanmış uç ile meydana gelmiştir. Ortalama Fx değerleri (Şekil 11b) dikkate alındığında, kesici uç kaplamalarının performansı iyiden kötüye (en düşük Fx değerinden en yüksek değere) TiAlN, TiCN, TiCN + TiN, AlTiN + TiN ve AlTiN şeklinde sıralanmıştır. TiAlN kaplanmış kesici uçlar en yüksek Fx değerinin ölçüldüğü AlTiN kaplamaya göre Fx kuvvetini %27,6 azaltmıştır. TiCN kaplamanın TiAlN kaplamadan daha yüksek kuvvet değeri verdiği AISI 304 çeliğinin frezelenmesi üzerine Hosokawa vd. tarafından yapılan çalışmada da belirtilmiştir [13]. Ayrıca literatürde AlTiN kaplı takımların en yüksek kuvvet ve aşınma değerleri verdiği bulunmuştur [14]. Bu sonucun AlTiN kaplamanın yüksek sürtünme katsayısına sahip olduğu için meydana geldiği ifade edilmiştir.



Şekil 11. Farklı kaplamalar için a) Fx sonuçlarının paso sayısı ile değişimi, b) ortalama Fx sonuçları (a) Change of Fx results with pass number, b) average Fx results for different coatings)

Farklı kaplama malzemeleri için Fy değerleri paso sayısına bağlı olarak Şekil 12a'da, iki pasonun ortalama Fy değerleri ise Şekil 12b'de verilmiştir. Paso sayısındaki artış ile Fy kuvvetindeki en büyük değişim, diğer uçlara nazaran TiCN+TiN kaplanmış uç ile elde edilmiştir. Ortalama Fy değerleri (Şekil 12b) dikkate alındığında, kesici uç kaplamalarının performansı iyiden kötüye (en düşük Fy değerinden en yüksek değere) TiAlN, TiCN + TiN, AlTiN + TiN, AlTiN, ve TiCN şeklinde sıralanmıştır. TiAlN kaplanmış kesici uçların en yüksek Fy değerinin ölçüldüğü TiCN kaplamaya göre Fy kuvvetinde %20 azalmaya neden olduğu bulunmuştur.

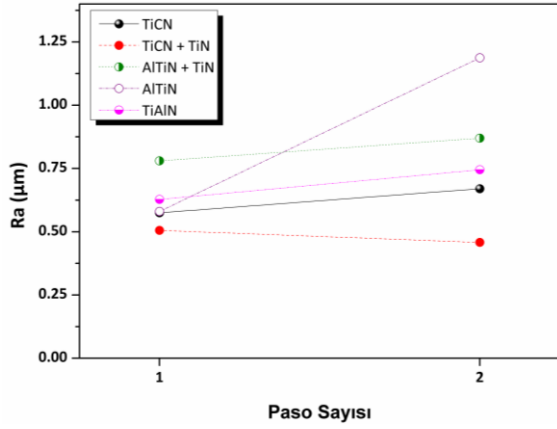


Şekil 12. Farklı kaplamalar için a) Fy sonuçlarının paso sayısı ile değişimi, b) ortalama Fy sonuçları (a) Change of Fy results with pass number, b) average Fy results for different coatings)

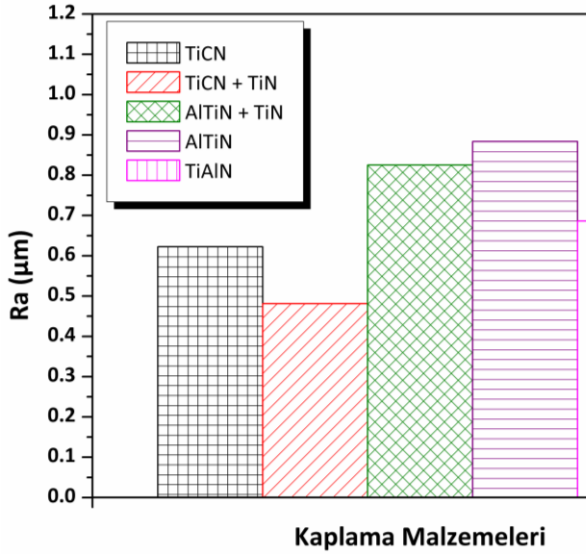
3.3. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Farklı kaplama malzemeleri için Ra değerleri paso sayısına bağlı olarak Şekil 13a'da, iki pasonun ortalama Ra değerleri ise Şekil 13b'de verilmiştir. Her iki pasoda da TiCN + TiN kaplanmış kesici uçlar ile işlenen yüzey en düşük Ra değerini vermiştir. Paso sayısındaki artış ile Ra değerindeki en büyük değişim, diğer uçlara nazaran AlTiN kaplanmış uç ile elde edilmiştir. Ortalama Ra

değerleri (Şekil 13b) dikkate alındığında, kesici uç kaplamalarının performansı iyiden kötüye (en düşük Ra değerinden en yüksek değere) TiCN + TiN, TiCN, TiAlN, AlTiN + TiN ve AlTiN şeklinde sıralanmıştır. TiCN + TiN kaplanmış kesici uçlar en yüksek Ra değerinin ölçüldüğü AlTiN kaplamaya göre Ra değerini %45,5 azaltmıştır. İki katmanlı kaplamaların (TiCN + TiN ve AlTiN + TiN) tek katmanlı kaplamalara (TiCN ve AlTiN) göre daha düşük Ra değeri verdiği bulunmuştur.



a)



b)

Şekil 13. Farklı kaplamalar için a) Ra sonuçlarının paso sayısı ile değişimi, b) ortalama Ra sonuçları (a) Change of Ra results with pass number, b) average Ra results for different coatings)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu deneysel çalışmada, tek katlı TiCN, AlTiN, TiAlN ve iki katlı TiCN + TiN ve AlTiN + TiN gibi 5 çeşit kaplamalı karbür takma uçların AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin frezelemedeki performansı takım aşınması, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü ile değerlendirilmiştir. Bu çalışmada literatürden farklı olarak AISI 304 malzemesinin frezelemede çeşitli

tek ve iki katlı kaplamalı karbür takma uçların performansı karşılaştırılmıştır. En düşük serbest yüzey aşınması ve yüzey pürüzlülüğü TiCN + TiN kaplanmış kesici uçlar ile en yüksek aşınma ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ise AlTiN kaplamalı kesici uçlar ile elde edilmiştir. En düşük serbest yüzey aşınması TiCN + TiN kaplanmış uç ile 0,12 mm olarak, en yüksek aşınma ise AlTiN kaplanmış uç ile 0,47 mm olarak ölçülmüştür ve TiCN + TiN kaplanmış kesici uçlar AlTiN kaplamaya göre aşınmayı %43,4 azaltmıştır. TiCN + TiN kaplanmış kesici uçlar, en yüksek Ra değerini veren AlTiN kaplamaya göre Ra değerinde %45,5 azalmaya neden olmuştur. En düşük Fx ve Fy kuvvetleri TiAlN kaplamalı kesici uçlar ile ölçülmüştür. TiAlN kaplanmış kesici uçlar en yüksek Fx değerinin ölçüldüğü AlTiN kaplamaya göre Fx kuvvetini %27,6; en yüksek Fy değerinin ölçüldüğü TiCN kaplamaya göre Fy değerini %20 azaltmıştır. EDX analizi sonucunda kesici uçlarda yapışmanın ve kaplama kalkmasının meydana geldiği ve literatürdeki sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmüştür. AISI 304 paslanmaz çeliğinin frezelemede diğer kaplamalı uçlara nazaran en olumsuz performansı AlTiN kaplamalı kesici uçlar göstermiştir. Özellikle bu kaplama malzemesinde aşırı kırılma ve yapışma gözlemlenmiştir.

5. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazar, bu çalışmanın yürütüldüğü Bilgisayar Destekli İmalat laboratuvarının tüm imkanlarını sunan Prof. Dr. Babür Özçelik'e, frezeleme işlemi esnasındaki yardımlarından dolayı Tekniker Önder Gedik'e ve SEM görüntülerinin alınmasındaki yardımlarından dolayı Uzman Ahmet Nazım'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kuram E., Ozcelik B., Demirbas E., Şık E. and Tansel I. N., "Evaluation of new vegetable-based cutting fluids on thrust force and surface roughness in drilling of AISI 304 using Taguchi method", *Materials and Manufacturing Processes*, 26: 1136-1146, (2011).
2. Biermann D., Steiner M. and Krebs E., "Investigation of different hard coatings for micromilling of austenitic stainless steel", *Procedia CIRP*, 7: 246-251, (2013).
3. Ciftci I., "Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools", *Tribology International*, 39: 565-569, (2006).
4. Selinder T. I., Sjöstrand M. E., Nordin M., Larsson M., Östlund A. and Hogmark S., "Performance of PVD TiN/TaN and TiN/NbN superlattice coated cemented carbide tools in stainless steel machining", *Surface and Coatings Technology*, 105: 51-55, (1998).
5. Fernandez-Abia A. I., Barreiro J., Fernandez-Larrinoa J., Lopez de Lacalle L. N., Fernandez-Valdivielso A. and Pereira O. M., "Behaviour of PVD coatings in the turning of austenitic stainless steels", *Procedia Engineering*, 63: 133-141, (2013).
6. Özer A. ve Bahçeci E., "AISI 410 martensitik paslanmaz çeliklerin kesici takım ve kaplamasına bağlı işlenebilirliği", *Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 24: 693-698, (2009).
7. Endrino J. L., Fox-Rabinovich G. S., Gey C., "Hard AlTiN, AlCrN PVD coatings for machining of austenitic

- stainless steel”, *Surface and Coatings Technology*, 200: 6840-6845, (2006).
8. Grzesik W., “Experimental investigation of the cutting temperature when turning with coated indexable inserts”, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 39: 355-369, (1999).
 9. Grzesik W., “The role of coatings in controlling the cutting process when turning with coated indexable inserts”, *Journal of Materials Processing Technology*, 79: 133-143, (1998).
 10. Altinkaya E., Güllü A., “AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğin işlenmesinde kesme hızının ve takım kaplamasının takım aşınmasına etkileri”, *Politeknik Dergisi*, 11: 243-247, (2008).
 11. Li P., “Micromilling of hardened tool steels”, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, (2009).
 12. Wertheim R., Layous A., Harpaz J., “Development and application of new cutting tool materials”, *Fourth International Conference on Industrial Tooling*, Southampton, 1-13, (2001).
 13. Hosokawa A., Shimamura K., Ueda T., “Cutting characteristics of PVD-coated tools deposited by unbalanced magnetron sputtering method”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61: 95-98, (2012).
 14. Kulkarni A. P., Sargade V. G., “Characterization and performance of AlTiN, AlTiCrN, TiN/TiAlN PVD coated carbide tools while turning SS 304”, *Materials and Manufacturing Processes*, 30: 748-755, (2015).

Sıcak Ekstrüze Edilmiş Al 2024 Matrisli B₄C/Al₂O₃ Takviyeli Hibrit Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu

Uğur GÖKMEN

Gazi Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Tek. Böl. ANKARA

(Geliş / Received : 27.01.2016 ; Kabul / Accepted : 18.03.2016)

ÖZ

Yapılan çalışmada son yıllarda özellikle uzay sanayiinde yaygın olarak tercih edilen Al 2XXX serisi alaşımların özel bir türü olan Al 2024 tozu (Al-Cu-Mg) içerisine ağırlıkça farklı oranlarda (% 5-10-15) B₄C ve Al₂O₃ parçacıkları ilave edilerek hibrit/kompozitler üretilmiştir. Matris tozu ve takviye elemanları 3 boyutlu karıştırıcı ile 45 dakika karıştırılmıştır. Karışım tozlar tek yönlü basınç (400 MPa) altında preslenerek toz metal numuneler elde edilmiştir. Elde edilen blok numuneler 600°C sıcaklıkta sinterlenmiş ve devamında 500°C sıcaklıkta kalıp içerisinden geçirilerek ekstrüze edilmiştir. Ekstrüze işlemi sonrası numuneler tel erozyon yöntemi ile kesilerek standart boyutlarda çapraz kırılma test numuneleri elde edilmiştir. Yapılan ölçümler sonunda sinterlenmiş numunelerin ekstrüzyon sonrası yoğunluklarının daha da arttığı görülmüştür. Takviye elemanın miktarındaki artışa bağlı olarak sertlik ve çapraz kırılma dayanım değerlerinde artış tespit edilmiştir. Bu çalışmada en yüksek çapraz kırılma dayanımı (920 MPa) ve en yüksek sertlik (110 HB) değerleri sırasıyla %10 B₄C ve %15 B₄C takviyeli numunelerde sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hibrit kompozit, toz metalurjisi, sıcak ekstrüzyon

Fabrication and Characterization of Hot Extruded Hybrid Composites Al 2024 Matrix Reinforced With B₄C/Al₂O₃

ABSTRACT

In this study, 2024 alloy powder (Al-Cu-Mg), commonly used for aerospace industry, reinforced with B₄C and Al₂O₃ particles (5-10-15% wt.) were used to produce hybrid/composite. Matrix powder and reinforcement components were mixed in a three dimensional mixer for 45 minutes and then compacted under uniaxial press (400 MPa) in order to produce powder blocks. These blocks were sintered at 600°C and then extruded at 500°C. Then samples were cut with wire erosion method to ensure the appropriate standard dimension for transverse rupture strength (TRS) tests. The increase was observed in the density of extruded parts in comparing with the sintered samples. Furthermore, rising in hardness and transverse rupture strength values were determined depending on the increase in the amount of the reinforcing components. In the study, maximum transverse rupture strength of 920MPa and hardness of 115HB were reached with at %10 B₄C and %15 B₄C reinforced samples respectively.

Keywords: Hybrid composite, powder metallurgy, hot extrusion

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kompozit malzemeler geliştirilmiş fiziksel ve mekanik özelliklerinden dolayı modern teknolojinin aranan malzemeleri haline gelmiştir. Metal Matrisli Kompozitler (MMK) son yıllarda önemli gelişmeler göstermiştir. MMK'ler içerisine ilave edilen güçlü seramik takviyeler ile iyi aşınma direnci, yüksek sertlik, özel dayanım ve mükemmel korozyon direnci sergileyen yeni nesil mühendislik malzemeleridir [1]. Alüminyum matrisli kompozitler ise günümüz teknolojisinde metal matrisli kompozitlerin en yaygın tercih edilen türlerinden birini oluşturmaktadır [2]. Alüminyum hafifliğinin ve geliştirilebilir dayanımının yanı sıra iyi elektriksel ve ısıl

iletkenlik, yüksek ısı ve ışık yansıtma özelliğine de sahiptir [3]. Al matrisli kompozitler yüksek aşınma direnci, düşük yoğunluk, geliştirilmiş elastik modül ve esnek üretim kabiliyeti sebebiyle başta otomotiv ve havacılık endüstrisi olmak üzere birçok sektörde uygulama alanı bulabilen malzemelerdir [4, 5]. Özellikle 2xxx serisi Alüminyum alaşımları, geliştirilmiş mekanik özellikleri ile uçak ve otomobillerin yapısal parçalarında tercih edilmektedir [6]. İleri üretim yöntemleriyle üretilmiş Al 2024 alüminyum alaşımında bakır, magnezyum, mangan bulunurken, diğer alaşım elementleri eser miktarda bulunmaktadır [7].

Alüminyum matris içerisine kompozit malzeme oluşturmak için ilave edilen seramik parçacıkların en yaygın türleri arasında Al₂O₃, SiC ve B₄C bulunmaktadır ve Alüminyumun matris yapı içerisine ilave edilen bu seramik parçacıklar MMK'lerin gelişmesinde anahtar bir

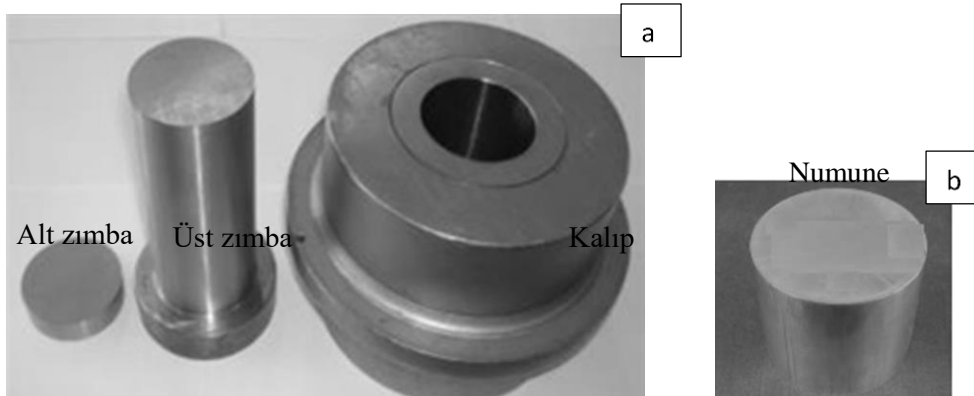
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: uugurgokmen@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 445-453

rol oynamıştır [8-10]. Hibrit metal matrisli kompozitler ise iki veya daha fazla birbirinden farklı takviye elemanının bir arada bulunduğu, kullanılan takviye elemanlarının avantajlarından yararlanmak için bir araya getirilmiş mühendislik malzemelerinin bir türünü oluşturmaktadır. Hibrit yapılar oldukça geniş bir alanda malzeme tasarımına imkân sunmaktadır [11, 12]. Kompozit malzemeler farklı yöntemler ile üretilebilirler, bu yöntemlerin en yaygın tercih edilenleri döküm ve toz metalürjisidir. Döküm yöntemi şekil ve boyut sınırının olmadığı parçaların üretiminde geleneksel döküm aparatları kullanılarak yapıldığı için basit ve ekonomiktir [13]. Şekil ve boyut sınırlamasının ön plana çıktığı ve farklı tür seramik parçacıkların matris yapı içerisinde aktif rol oynamasının istendiği yapısal malzemelerde ise toz metalürjisi yöntemi ön plana çıkmaktadır. Toz metalürjisi yöntemi MMK'lerin üretiminde en sık kullanılan tekniklerden birisidir. Ayrıca döküm yöntemi ile toz metalürjisi yöntemi mukayese edildiğinde toz metalürjisinin avantajlarından birisi toz metal parçalar içerisinde takviye elemanı dağılımının ve bir diğerinin ise mikroyapı üzerinde kontrolün daha iyi olduğu belirtilmiştir [2]. Ekstrüzyon işlemi MMK'lerin mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılan yöntemlerdendir [13]. Sıcak ekstrüzyon yöntemi ile Al esaslı kompozit malzeme yüzeyindeki oksit tabakası yok edilebilir ve bunun sonucunda parçacıklar arası sınırlar iyileşebilir. Ayrıca matris yapı içerisindeki takviye elemanı topaklanması giderilebilir ve böylece daha homojen dağılmış takviye elemanları içeren bir yapı elde edilebilir [14].

Yapılan çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle değişen oranlarda (ağırlıkça %5-10-15) B_4C ve Al_2O_3 takviyeli Al 2024 matrisli kompozitler üretilmiştir. Üretim sonrası aynı matris içerisine %5 B_4C ve %5 Al_2O_3 ilave edilerek hibrit kompozit yapılar oluşturulmuştur. Üretilen kompozitler sıcak ekstrüzyon edilerek yoğunlaştırma ikinci işlemine tabi tutulmuştur. Sıcak ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen numuneler mekanik ve mikroyapısal olarak karakterize edilmiştir.



Şekil 1. a) Kalıp seti b) Toz metal blok numune (a) Die components b) Powder metal block sample)

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Malzeme (Materials)

Yapılan çalışmada Toz Metalürjisi (TM) ve sıcak ekstrüzyon yöntemi kullanılarak kompozit numuneler üretilmiştir. Matris malzemesi olarak ön alaşımlı Al 2024, takviye elemanı olarak B_4C ve Al_2O_3 tozları kullanılmıştır. Al 2024 tozunun kimyasal kompozisyonu Çizelge 1'de verilmiştir. Tozların ortalama parçacık boyutları Malvern Mastersizer E versiyon 1.2b marka lazer saçınım toz boyut ölçme cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Kullanılan tozların fiziksel özellikleri Çizelge 2'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Matris alaşımının kimyasal kompozisyonu (Chemical composition of the matrix alloy)

Element	Cu	Mg	Mn	Fe	Al
Oran (%) Ağırlıkça)	4,4	1,8	0,25	0,5	Kalan

Çizelge 2. Kullanılan tozların fiziksel özellikleri (Physical properties of powders used)

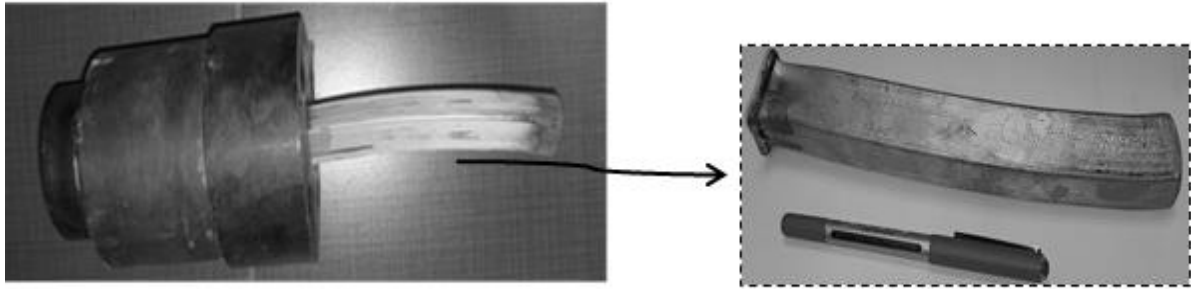
Malzeme	Fiziksel Özellikler		
	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime sıcaklığı (°C)	Toz boyutu (µm)
Al 2024	2,74	630	<160
B_4C	2,50	2350	<20
Al_2O_3	3,97	2040	<32

2.2. Metot (Method)

Ön alaşımlı Al 2024 tozu ağırlıkça % 5-10-15 oranlarında B_4C ve Al_2O_3 tozları ile ayrı ayrı karıştırılmıştır. Al 2024 tozu içerisine ağırlıkça % 5 B_4C ve % 5 Al_2O_3 tozları ilave edilerek hibrit kompozitler elde edilmiştir. Karıştırma işlemi turbula marka T2F tipi üç boyutlu karıştırıcı ile homojen bir dağılım elde etmek amacıyla 45 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Karışım tozlar özel tasarlanmış kalıp seti içerisinde 400 MPa basınç altında tek yönlü preslenerek 62 mm çapında, 80 mm uzunluğunda silindirik toz metal blok numuneler

üretilemiştir. Şekil 1’de kullanılan kalıp seti ve sıkıştırma işlemi sonrası elde edilen numune görülmektedir.

Presleme işlemi ile elde edilen toz metal blok numuneler Protherm marka fırın içerisinde 600°C sıcaklıkta 1 saat bekletilerek sinterleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Sinterleme işlemi sonrası yoğunlaştırma (ikincil işlem) amacıyla numuneler özel tasarım ekstrüzyon kalıbı içerisine yerleştirilerek 500°C sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Daha sonra blok numuneler 1/4 oranında ekstrüze edilmiştir. Ekstrüzyon sonrası numune görüntüsü Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Ekstrüzyon kalıbı ve işlem sonra elde edilen numune (Extrusion die and sample)

Ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen ürünler tel erozyon yöntemi ile kesilerek toz metal ürün Standartlarına (MPFI-41, 1998) uygun çapraz kırılma numunesi haline getirilmiştir. Kolaylık sağlamak amacıyla her numuneye ayrı bir kod verilmiştir, kodların yanındaki rakamlar % ağırlık oranlarını temsil eder. Numune kodları Çizelge 3’te gösterilmiştir.

Çizelge 3. Farklı numunelerin ayrıntılı bileşimleri (Exhaustive composition of various samples)

Numune kodu	Kompozisyon (% Ağırlıkça)
AB0	Al2024
B5	Al2024 + % 5 B ₄ C
B10	Al2024 + % 10 B ₄ C
B15	Al2024 + % 15 B ₄ C
A5	Al2024 + % 5 Al ₂ O ₃
A10	Al2024 + % 10 Al ₂ O ₃
A15	Al2024 + % 15 Al ₂ O ₃
B5A5	Al2024 + % 5 B ₄ C + % 5 Al ₂ O ₃

2.3. Karakterizasyon (Characterization)

Toz metalurjisi ve sıcak ekstrüzyon yoluyla üretilen ürünlerin yoğunlukları Sartorius marka 0,0001 g hassasiyetine sahip terazi ve yoğunluk kiti kullanılarak Arşimet prensibine göre belirlenmiştir. Elde edilen kompozit numuneler karakterizasyon işlemleri için 240-400-800-1200’ lük zımparalar ile su altında zımparalanmış ve daha sonra parlatma keçelerinde 1 ve 3 µm’ lik elmas pasta kullanılarak parlatma yapılmıştır. Üretilen hibrit kompozitlerin içerisinde dağılımı

B₄C/Al₂O₃ parçacıkların matris malzeme ile ara yüzeyleri Leica marka optik mikroskop ve JEOL JSM 6060LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımı ile incelenmiştir ve EDS analizleri yapılmıştır. SEM yardımı ile kırık yüzeyler karakterize edilmiştir.

Kompozit numunelerin sertlik ölçümleri Emco test duravison 2000 marka sertlik ölçüm cihazı kullanılarak Brinell olarak ölçülmüştür. Sertlik değerleri her numune için 5 farklı bölgeden alınan ölçümlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Sinterlenmiş ve ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş numunelerin çapraz kırılma

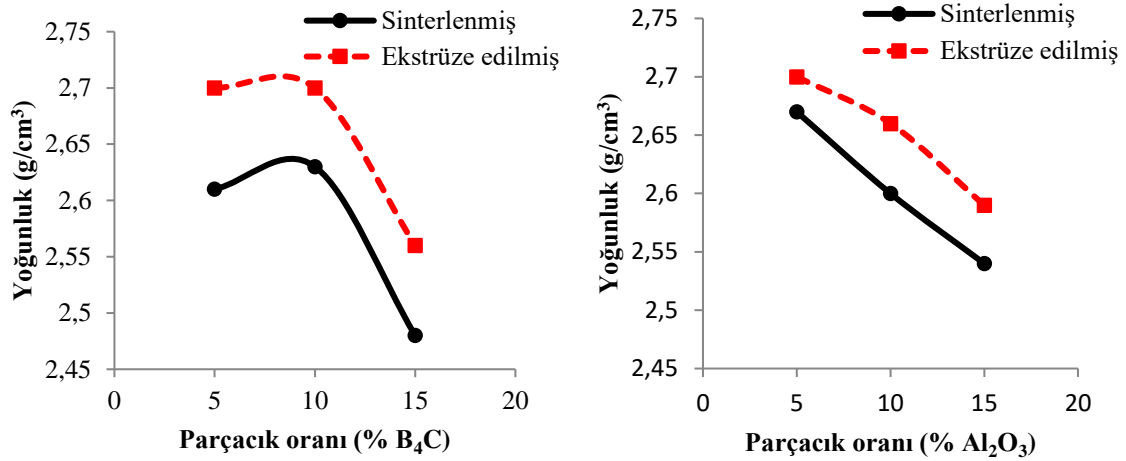
testleri Instron 3369 model test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Çapraz kırılma testleri her bir kompozit için 3 farklı numunenin ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Test numunelerinin hazırlanmasında ve testlerin yapılmasında MPIF Standart 41 ve daha önce yapılmış çalışmalar referans alınmıştır [15].

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Yoğunluk ve Mikroyapı Analizi (Density and Microstructure Analysis)

Üretilen kompozit ve hibrit kompozitlerin yoğunluk değerleri hesaplanmış ve mikroyapıları karakterize edilmiştir. Arşimet prensibi uygulanarak hesaplanan yoğunluk değerleri Şekil 3’te verilmiştir. İlave edilen takviye elemanlarının miktarındaki artışa bağlı olarak yoğunlukta azalma tespit edilmiştir. Her iki takviye elemanı kullanılarak hazırlanan MMK’de sinterleme ve ekstrüzyon işlemi sonrası yoğunluk değerlerinde değişiklik tespit edilmiştir. Takviye miktarının artışına bağlı olarak yoğunluk değerlerinde meydana gelen azalmanın nedenin matris malzeme ile parçacık ara yüzeyinde tespit edilen boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir.

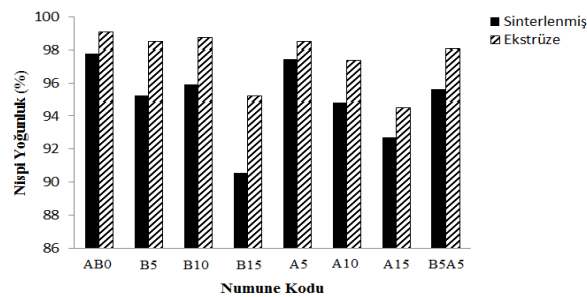
Parçacık miktarındaki artışa bağlı olarak ara yüzeyde gözlenen boşluk miktarının arttığı ve bu duruma paralel olarak yoğunluğun azaldığı tespit edilmiştir. Sinterleme işleminin akabinde yapılan sıcak ekstrüzyon ile yoğunlukta meydana gelen artışın sebebinin matris malzeme ile parçacık ara yüzeyinde bulunan boşlukların kısmen kapanmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Wang ve arkadaşları benzer bir çalışmada Al-Cu toz metal matrisi içerisine hacimce % 10, 15 ve 20 oran-



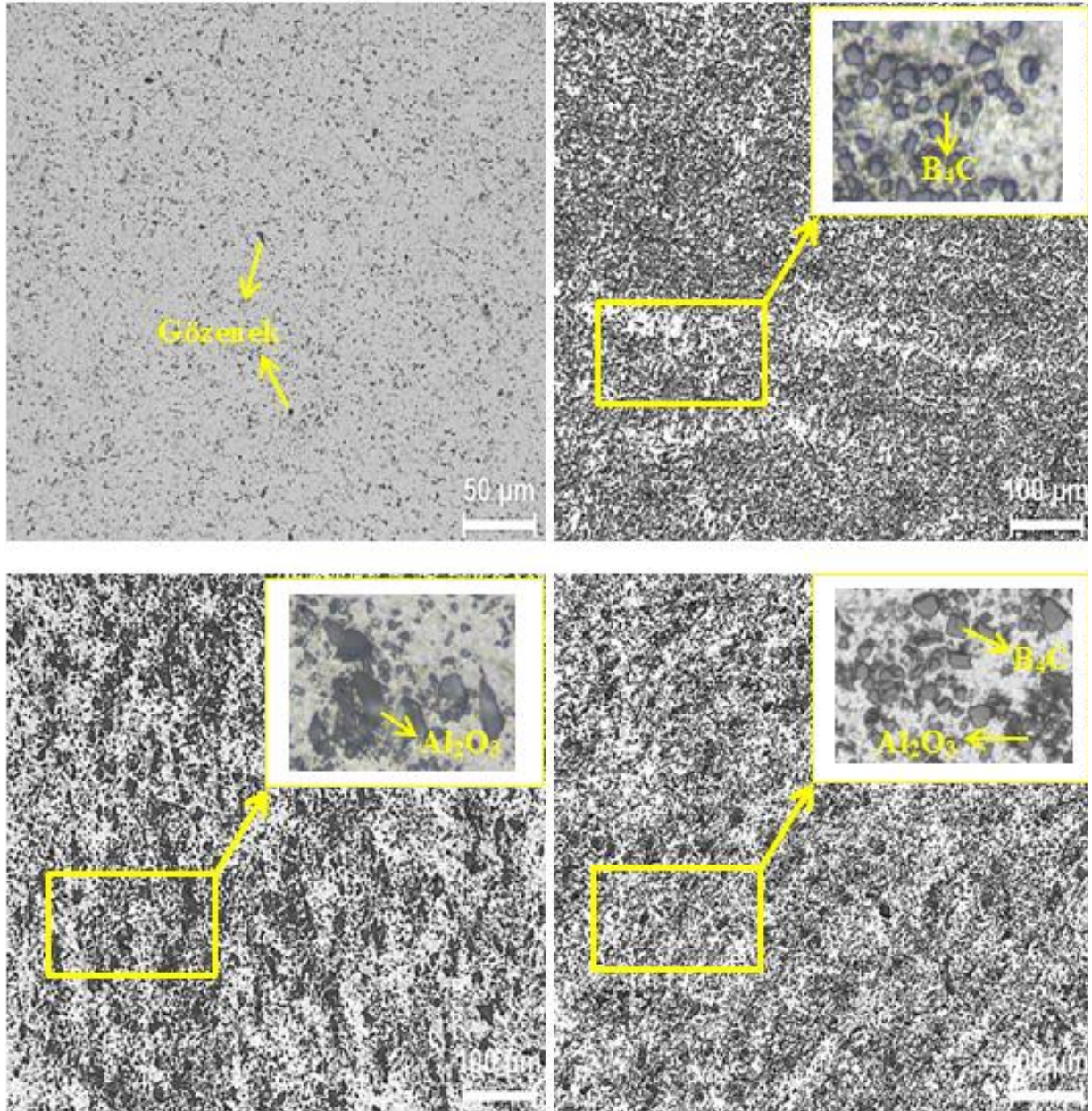
Şekil 3. Al 2024 içerisindeki B₄C ve Al₂O₃ oranındaki artışa bağlı olarak yoğunluk değişimi (Density variation depending on the added B₄C and Al₂O₃ particles in the Al 2024)

larında SiC ilave etmişler ve elde ettikleri MMK'ı karakterize etmişlerdir. Araştırmacılar yaptıkları çalışmada parçacık miktarındaki artışa bağlı olarak yoğunlukta bir azalmanın olduğu ve ekstrüzyon işlemi sonrası üretilen kompozitlerin yoğunluğunda artış meydana geldiğini tespit etmişlerdir. Ekstrüzyon işlemi ile oluşan yüksek basınçtan dolayı yüzeyde oluşmuş olabilecek oksit tabakasının parçalandığını bu duruma bağlı olarak matris malzeme ile parçacık arayüzeyinde meydana gelen yapışmanın geliştiğini ve yapı içerisinde bulunan gözeneklerin kapandığını belirtmişlerdir [16]. Üretilen kompozit numunelere ve hibrit kompozite ait sinterleme ve akabinde yapılan ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen yoğunluk değerleri Şekil 4'te mukayese edilmiştir. Şekil 4'te verilen yoğunluk değerleri incelendiğinde matris malzemeye kıyasla kompozitlerin yoğunluğunun daha düşük olduğu, takviye elemanı artışına bağlı olarak yoğunluğun azaldığı ve üretilen hibrit kompozitin (B5A5) ağırlıkça % 10 B₄C ve Al₂O₃ içeren (B10 ve A10) numunelere daha yakın olduğu gözlenmektedir. Aynı oranda takviye elemanı içeren numunelerde farklı yoğunluk değerlerinin tespit edilmesinin sebebinin kullanılan parçacık boyutundaki değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. Parçacık boyutundaki artışa bağlı olarak toz metal parçaların yoğunluğunda azalma olduğu bilinmektedir [2].

Şekil 5'te sinterleme ve ekstrüzyon işlemi yapılmış %10 B₄C, %10 Al₂O₃ içeren ve hibrit kompozit (B5A5) numuneye ait optik mikroskop resimleri verilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için matris içerisinde aynı oranda parçacık bulunan numuneler tercih edilmiştir. Parçacık ve matris malzeme arayüzeyi ilişkisini gösteren yüksek büyütmede alınan mikroyapı görüntüleri Şekil 5 üzerinde kutucuklar ile sergilenmiştir. Şekil 5'te verilen optik mikroskop görüntülerine göre Al 2024 matris içerisinde bulunan parçacıklar homojen olarak dağılmıştır. Matris yapı üzerinde bulunan gözeneklerin ise birbirinden bağımsız olduğu gözlenmiştir. Şekil 5 üzerinde verilen yüksek büyütme ile alınmış görüntüler incelendiğinde numunelerde kısmen topaklanma olduğu tespit edilmiştir. Şekil 6-8'de verilen SEM görüntüleri Al 2024 matris ve parçacıklar arasında tespit edilen kısmi topaklanmaları destekler niteliktedir. Toz metal kompozit malzemeler de parçacıkların topaklanmaya, gözeneklere sebep olduğu ve bu durumun malzeme performansını etkilediği bilinmektedir [17]. Yapılan incelemelerde ekstrüzyon işlemi öncesi takviye parçacıklarının yapı içerisinde meydana getirdiği topaklanmanın daha fazla olduğu ekstrüzyon işlemi sonrası topaklanmaların dağıldığı ve daha homojen bir yapının oluştuğu gözlenmiştir.



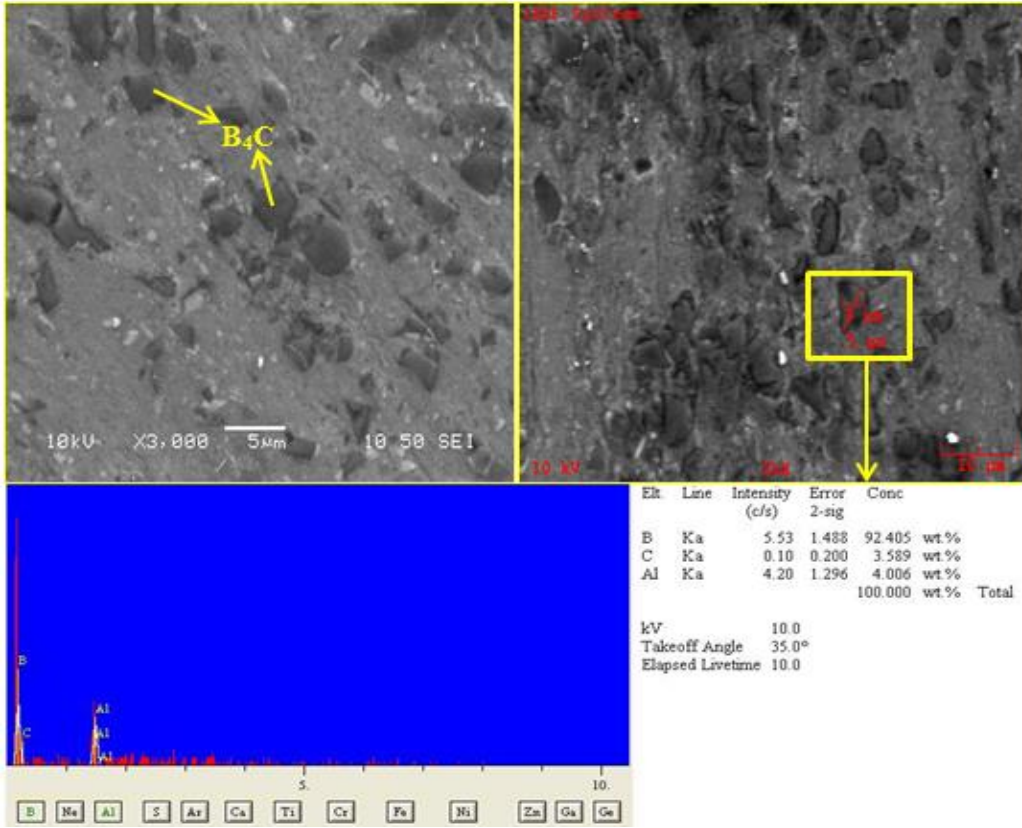
Şekil 4. Al 2024 matrisli hibrit/kompozitlerin yoğunluk değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of density values of Al 2024 matrix hybrid/composites)



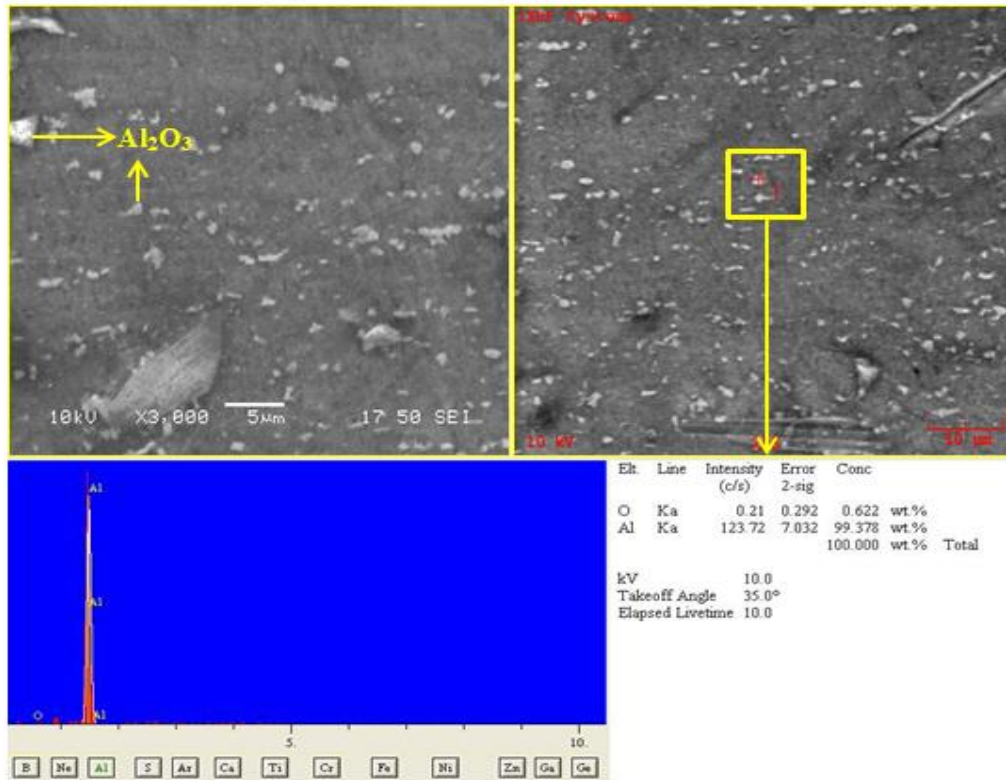
Şekil 5. Hibrit/Kompozitlerin optik mikroyapı resimleri: (a)AB0, (b)B10, (c)A10, (d)B5A5 (Optical microstructure images of hybrid/composites for: (a)AB0, (b)B10, (c)A10, (d)B5A5)

Şekil 6-8 de Al 2024 matris içerisinde B₄C ve Al₂O₃ parçacıklarının dağılımını gösteren SEM resimleri ve EDS analiz değerleri verilmiştir. Şekil 6-8 de verilen görüntülere göre kompozit içerisinde var olan parçacıkların homojen olarak dağıldığı söylenebilir. Matris yüzeyi ile B₄C ve Al₂O₃ parçacıkları arasında kısmen boşluklar ve ayrıca Şekil 6 ve 7’de verilen SEM görüntülerine göre bazı bölgelerde kısmen parçacık kümelenmelerinin olduğu gözlenmiştir. Fakat kompozit yapının tamamında bu parçacık kümelenmelerinin olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan sıcak ekstrüzyon

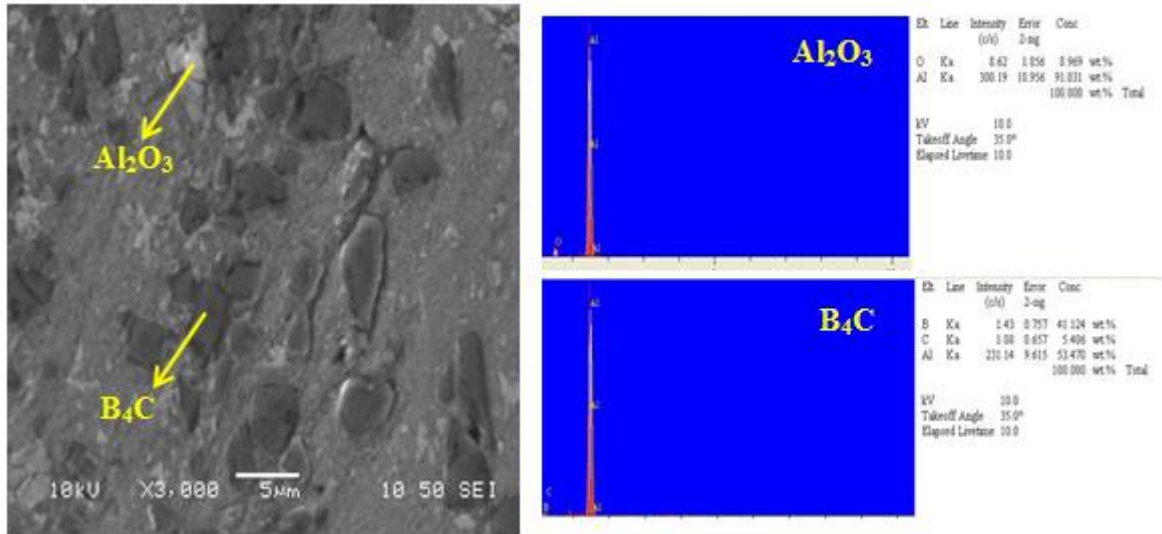
işleminin parçacık kümelenmelerini dağıttığı ve matris içerisinde seramik parçacık dağılımının homojen olmasını desteklediği düşünülmektedir. Al 2024 matris ile seramik parçacıkları arasında boşluklar izlenmiştir. Şekil 8’de verilen hibrit kompozite ait SEM görüntüsü incelendiğinde B₄C parçacıkları etrafında Al₂O₃ parçacıklarının kısmen kümelendiği görülmektedir ve bu duruma bağlı olarak aynı oranda parçacık içeren numunelere kıyaslı hibrit kompozit malzemenin yoğunluğunda bir miktar artış olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6. B₄C (%10 ağırlıkça) içeren Al 2024 esaslı kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS analiz değerleri (EDS analysis values and SEM pictures of Al 2024 based B₄C (10 wt.%) reinforced composites)



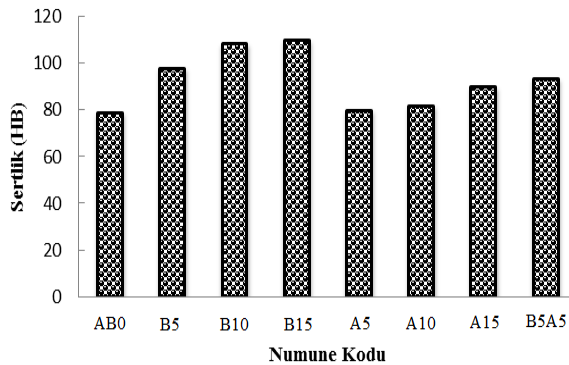
Şekil 7. Al₂O₃ (%10 ağırlıkça) içeren Al 2024 esaslı kompozitlerin SEM görüntüleri ve EDS analiz değerleri



Şekil 8. B₄C ve Al₂O₃ içeren Al 2024 esaslı hibrit kompozitin SEM görüntüleri ve EDS analiz değerleri (EDS analysis values and SEM pictures of Al 2024 based B₄C and Al₂O₃ reinforced hybrid composites)

3.2. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

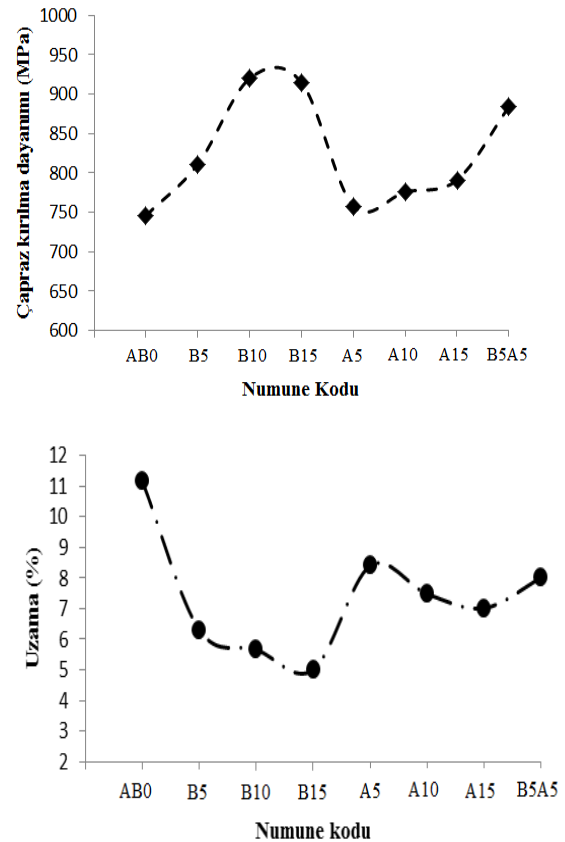
Şekil 9'da Al 2024 matrisli B₄C ve Al₂O₃ parçacık takviyeli sinterleme ve sıcak ekstrüzyon işlemlerine tabi tutulmuş MMK numunelerin Brinell sertlik değerleri görülmektedir. Al 2024 matris içinde artan parçacık miktarına bağlı olarak sertlikte artış tespit edilmiştir. En düşük sertlik değeri takviye elemanı içermeyen Al 2024 numude ölçülmüştür. Al metal matrisli kompozitler üzerine yapılan benzer çalışmalarda aynı durum gözlenmiştir [18, 19]. En yüksek sertlik değerine 110 HB ile ağırlıkça %15 oranında B₄C içeren numunelerde ulaşılmıştır. %10 ve 15 B₄C içeren numunelerin sertlik değerlerinin yakın çıktığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. Hibrit/kompozitlerin sertlik değerleri (Hardness values of hybrid/composites)

Al 2024 matris içinde aynı oranda B₄C ve Al₂O₃ içeren numunelere ait sertlik değerleri mukayese edildiğinde B₄C içeren kompozitlerin sertlik değerlerinin önemli oranda daha yüksek çıktığı gözlenmektedir. B₄C parçacıkların SiC ve Al₂O₃ parçacıklardan daha düşük yoğunluğa ve daha yüksek sertliğe sahip oldukları bilinmektedir [20]. Bu duruma paralel olarak aynı miktarda B₄C içeren MMK'lerin Al₂O₃ içeren MMK'lere kıyasla daha yüksek sertlik sergiledikleri tespit

edilmiştir. Al 2024 matrisli B₄C ve Al₂O₃ takviyeli hibrit kompozite (B5A5) ait sertlik değerinin ağırlıkça %15 oranında Al₂O₃ içeren kompozit numuneden daha yüksek çıktığı tespit edilmiştir. Hibrit kompozit içerisinde bulunan %5 oranındaki B₄C'nin ve ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen yüksek yoğunluğun sertlikte artışa neden olduğu düşünülmektedir.

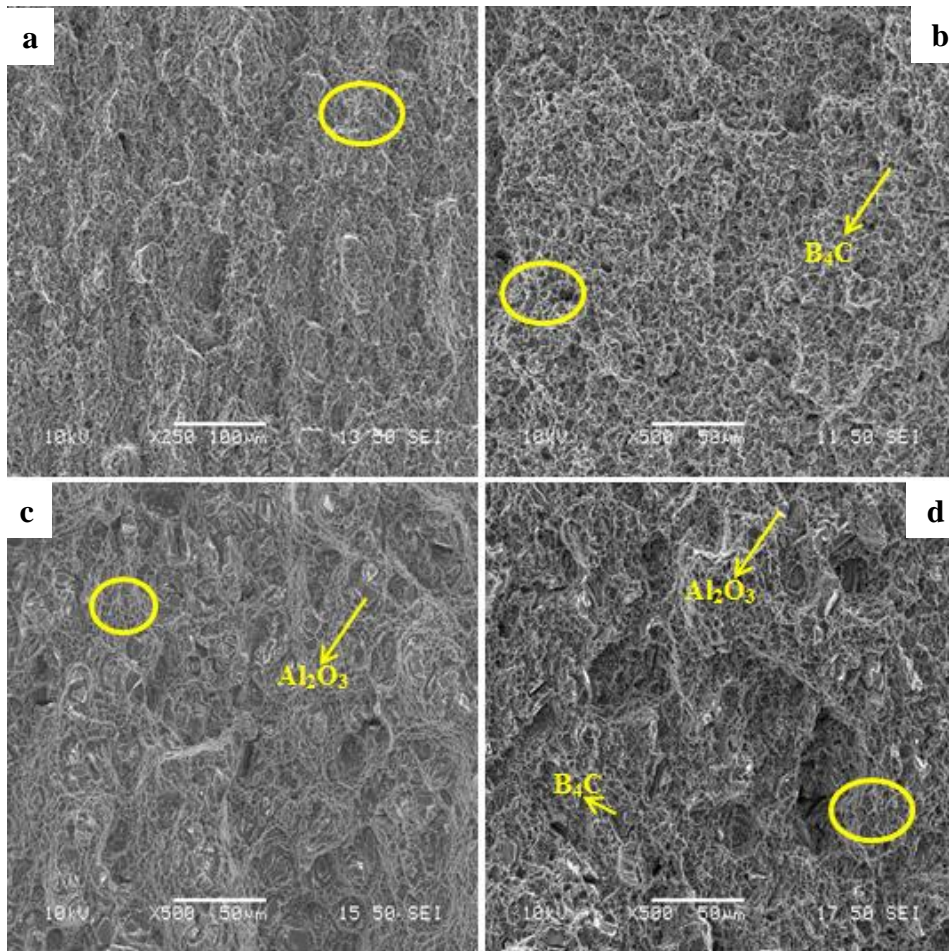


Şekil 10. Hibrit/kompozitlerin çapraz kırılma dayanımları ve uzama değerleri (Elongation values and transverse rupture strength of hybrid/composites)

Şekil 10'da Al 2024 MMK'lere uygulanan çapraz kırılma testi sonrası elde edilen dayanım değeri ve uzama değerleri verilmiştir. En yüksek çapraz kırılma dayanımı 920 MPa ile %10 B₄C içeren kompozit numunede elde edilmiştir. Ağırlıkça %10 ve %15 B₄C içeren numunelerde ulaşılan çapraz kırılma dayanımı değerlerinin birbirlerine yakın olduğu gözlemlenmiştir. En düşük çapraz kırılma dayanımı 746 MPa ile takviye elemanı içermeyen numunelerde tespit edilmiştir. Hibrit kompozit numunelerde (B5A5) elde edilen çapraz kırılma değeri Al₂O₃ takviyeli numunelerden daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebinin hibrit kompozitlerde elde edilen sertlik değerinin daha yüksek olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. Üretilen MMK'lerde ulaşılan en yüksek uzama miktarı takviye elemanı içermeyen numunelerde (AB0) ve en düşük uzama değeri %15 B₄C içeren kompozitlerde tespit edilmiştir. Uzama değerlerinde gözlenen değişim MMK'lerin sertlikleri ile paralellik sergilemektedir. Hibrit kompozit malzemelere (B5A5) ait çapraz kırılma ve uzama miktarlarında gözlenen değişimin ekstrüzyon işlemi ile B₄C ve Al₂O₃ parçacıkların birbirleri etrafında toplanarak parçacık/matris ara yüzeyini geliştirdiği bu duruma paralel olarak yoğunlukta artış meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

3.3. Kırık Yüzey Analizi (Fractography)

Şekil 11'de MMK numunelere (AB0, B10, A10, B5A5) ait çapraz kırılma işlemi sonrası elde edilen kırık yüzey SEM görüntüleri sunulmuştur. Al alaşımlarında hasarın genellikle büyük çökeltilerin ve parçacık kümelenmelerinin olduğu bölgelerde bazen de küçük çökeltiler etrafında ve mikro çatlaklar ile başladığı bilinmektedir [21]. Bütün numuneler çukurcuklu sünek kırılma davranışı sergilemiştir. Şekil 11'de seçilmiş kompozit numunelere ait SEM görüntüleri üzerinde görülen sarı halkalar çukurcuklara örnek olarak gösterilmektedir. Matrisin sünek olarak kopması parçacığın matris yüzeyine daha iyi gömüldüğüne bir işaret olarak düşünülmektedir. Çukurcukların boyutunun büyümesinin parçacık matris ilişkisini geliştirdiği ve sünek davranışı arttırdığı, küçük çukurcukların ise düşük süneklığe işaret ettiği bilinmektedir [22]. Şekil 11'de verilen görüntüler incelendiğinde Al₂O₃ içeren kompozitte (A10) elde edilen çukurcukların daha derin ve geniş olduğu tespit edilmiştir ve kırılma olayı parçacık etrafından gerçekleşmiştir. Parçacık ilavesiyle çukurlu kopma modlarının daha mikro düzeyde olması süneklığın kısıtlı olmasına neden olmuştur.



Şekil 11. Çapraz kırılma testi sonrası numune kırık yüzeyleri: (a)AB0, (b)B10, (c)A10, (d)B5A5 (The fracture surfaces after transverse rupture strength test for: (a)AB0, (b)B10, (c)A10, (d)B5A5)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan çalışmada B₄C ve Al₂O₃ parçacık takviyeli Al 2024 metal matrisli hibrit/kompozit numuneler geleneksel toz metalürjisi ve sıcak ekstrüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Sinterleme ve ekstrüzyon işlemleri sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

- Bütün numunelerde sinterleme işlemi akabinde yapılan sıcak ekstrüzyon işlemi ile yoğunlukta artış tespit edilmiştir.
- Al 2024 matris içerisine ilave edilen parçacık miktarındaki artışa bağlı olarak yoğunlukta azalma olduğu gözlemlenmiştir.
- Üretilen Al 2024 MMK'lerde en yüksek sertlik değerine ağırlıkça %15 B₄C içeren numunelerde ulaşılmıştır. En düşük sertliği takviye elemanı içermeyen numuneler sergilemiştir. Hibrit kompozit numunelerde Al₂O₃ içeren kompozitlerden daha yüksek sertlik değeri elde edilmiştir.
- Al 2024 matrisli hibrit kompozit numuneler aynı oranda (ağırlıkça %10) B₄C içeren numunelerden daha sünek davranış ve Al₂O₃ içeren numunelerden daha yüksek çapraz kırılma dayanımı sergilemiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kok, M., "Production and mechanical properties of Al₂O₃ particle-reinforced 2024 aluminium alloy composites", *Journal of Materials Processing Technology*, 161 (3): 381-387, (2005).
2. Rahimian, M., Ehsani, N., Parvin, N., Baharvandi, H.R., "The effect of particle size, sintering temperature and sintering time on the properties of Al-Al₂O₃ composites, made by powder metallurgy", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 5387-5393, (2009).
3. Sekmen, M., Günay, M., Şeker, U., "Alüminyum Alaşımının İşlenmesinde Kesme Hızı ve Talaş Açısının Yüzey Pürüzlülüğü, Yığıntı Talaş ve Yığıntı Katmanı Oluşumu Üzerine Etkisi", *Politeknik Dergisi*, 18 (3): 141-148, (2015).
4. Arik, H., Özçatalbaş, Y., Türker, M., "Dry Sliding Wear Behavior of in situ Al-Al₄C₃ MMC Produced by Mechanical Alloying Technique", *Materials and Design*, 27: 799-804, (2006).
5. Sharma, P., Sharma, S., Khanduja, D., "A study on microstructure of aluminium matrix composites", *Journal of Asian Ceramic Societies*, 3: 240-244, (2015).
6. Min, K.H., Kang, S.P., Kim, D.G., Kim, Y.D., "Sintering, characteristic of Al₂O₃-reinforced 2xxx series Al composite powders", *Journal of Alloys and Compounds*, 400: 150-153, (2005).
7. Aksöz, S., Özdemir, A.T., Bostan, B., "AA2014 Alüminyum Alaşım Tozlarının Karbon İle Sentezlenmesi ve Özellikleri'nin Belirlenmesi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimari Fakültesi Dergisi*, 27 (1): 109-115, (2012).
8. Garreno-Gallardo, C., Mendoza-Duarte, J.M., Lopez-Melendez, C., Estrada-Guel, I., Martinez-Sanchez, R., "Evaluation of Mechanical Properties of Aluminum Alloy (Al-2024) Reinforced with Carbon-Coated Silver Nanoparticles (AgCNP) Metal Matrix Composites", *Microscopy and Microanalysis*, 21, 3: 1041-1042, (2015).
9. Shorowordi, K.M., Laoui, T., Haseeb, A.S.M.A., Celis, J.P., Froyen, L., "Microstructure and interface characteristics of B₄C, SiC and Al₂O₃ reinforced Al matrix composites: a comparative study", *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 738-743, (2003).
10. Venkatesh, B., Harish, "Mechanical Properties Of Metal Matrix Composites (Al/SiCp) Particles Produced By Powder Metallurgy", *International Journal of Engineering Research and General Science*, 3(1): 1277-1284, (2015).
11. Ahmadi, A., Toroghinejad, M.R., Najafzadeh, A., "Evaluation of microstructure and mechanical properties of Al/Al₂O₃/SiC hybrid composite fabricated by accumulative roll bonding process", *Materials and Design*, 53: 13-19, (2014).
12. Ahamed, A.R., Asokan, P., Aravindan, S., Prakash, M.K., "Drilling of hybrid Al-5%SiC_p-5%B₄C_p metal matrix composites", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9): 871-877, (2010).
13. Rahmani Fard, R., Akhlaghi, F., "Effect of extrusion temperature on the microstructure and porosity of A356-SiCp composites", *Journal of Materials Processing Technology*, (187) 188: 433-436, (2007).
14. Zheng, R., Hao, X., Xiaoning, Yuan, Y., Wang, Z., Ameyama, K., Ma, Chaoli, "Effect of high volume fraction of B₄C particles on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy based composites", *Journal of Alloys and Compounds*, 576: 291-298, (2013).
15. Arik, H., Bağcı, C., "Investigation of Influences of Pressing Pressure and Sintering Temperature on the Mechanical Properties of Al-Al₄C₃ Composite Materials", *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 27: 53-58, (2003).
16. Wang, Z., Song, M., Sun, C., Xiao, D., He, Y., "Effect of extrusion and particle volume fraction on the mechanical properties of SiC reinforced Al-Cu alloy composites", *Materials Science and Engineering A*, 527: 6537-6542, (2010).
17. Dobrzanski, L.A., Wlodarczyk, A., Adamiak, M., "Structure, properties and corrosion resistance of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the Al₂O₃ ceramic particles", *Journal of Materials Processing Technology*, 162-163 27-32, (2005).
18. Karabulut, Ş., "Optimization of surface roughness and cutting force during AA7039/Al₂O₃ metal matrix composites milling using neural networks and Taguchi method", *Measurement*, 66: 139-149, (2015).
19. Varol, T., Canakci, A., Ozsahin, S., "Artificial neural network modeling to effect of reinforcement properties on the physical and mechanical properties of Al2024-B₄C composites produced by powder metallurgy", *Composites: Part B*, 54: 224-233, (2013).
20. Topcu, I., Gulsoy, H.O., Kadioglu, N., Gulluoglu, A.N., "Processing and mechanical properties of B₄C reinforced Al matrix composites", *Journal of Alloys and Compounds*, 482: 516-521, (2009).
21. Steglich, D., Brocks, W., Heerens, J., Pardoen, T., "Anisotropic ductile fracture of Al 2024 alloys", *Engineering Fracture Mechanics*, 75: 3692-3706, (2008).
22. Bauri, R., Surappa, M.K., "Processing and properties of Al-Li-SiCp composites", *Science and Technology of Advanced Materials*, 8: 494-502, (2007).

CANWEB: Denetleyici Alan Ağları için Web Temelli Eğitimsel Arayüz

Cüneyt BAYILMIŞ*, Zühal YILDIRIM*

*Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü

(Geliş / Received : 31.01.2016 ; Kabul / Accepted : 06.04.2016)

ÖZ

Denetleyici alan ağları, başta otomotiv olmak üzere endüstriyel otomasyon sistemlerinde yaygın olarak tercih edilen gerçek zamanlı bir seri haberleşme protokolüdür. Günümüzde birçok mikro işlemci/mikrodenetleyici denetleyici alan ağı haberleşme birimine sahiptir. Bilgisayar destekli öğrenimin bir türü olan web temelli arayüzler mühendislik eğitimindeki pratik uygulamaların anlaşılmasını kolaylaştıran son derece ekonomik araçlardır. Bu çalışmada denetleyici alan ağlarının anlaşılmasını kolaylaştıran bir web temelli eğitimsel arayüz sunulmaktadır. Bu eğitimsel arayüz kullanıcıya örnek bir denetleyici alan ağının çalışmasını inceleyebilme ve yeni bir denetleyici alan ağı benzetimini gerçekleştirebilme imkanı tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Web temelli eğitimsel arayüz, denetleyici alan ağı, bilgisayar destekli öğrenim

CANWEB: A Web-Based Educational Interface for Controller Area Networks

ABSTRACT

Controller area networks which are widely preferred in industrial automation systems including particularly automotive etc. are real-time a serial communication protocol. Nowadays, many microprocessor and microcontroller has a controller area network communication unit. Web-based interfaces, a type of computer-aided education are extremely economical tools which facilitate the understanding of the practical applications in engineering education. In order to facilitate the understanding of controller area networks the developed web-based educational interface is presented in this work. With usage the web-based education interface users can be examine working of an example controller area network and simulate a new controller area network.

Keywords: Web-based educational interface, controller area network, computer-assisted learning (CAL)

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik eğitiminde pratik ve deneysel uygulamalar önemli bir yere sahiptir. Bununla birlikte bu tür uygulamaları gerçekleştirmek için laboratuvar ortamı ve deney setleri gibi kayda değer bir maliyet ve bu ekipmanların kullanım zamanlarının planlanması gerekmektedir. Pratik uygulamaların bu tür dezavantajlarını gidermek için bilgisayar destekli öğrenim (Computer-assisted learning, CAL) yöntemlerinden biri olan web temelli arayüzler etkili bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır [1-3].

Web tabanlı arayüzlere kullanıcılar internet üzerinden mekan ve zaman kısıtlaması olmaksızın erişebilmektedirler. Web tabanlı arayüzler, mühendislik eğitiminde pratik uygulamaların anlaşılmasını kolaylaştıran ekonomik, hızlı, kolay, etkili eğitim ve öğretim araçlarıdır. Literatürde mühendislik eğitime yönelik olarak gerek ticari gerekse akademik amaçlı Java, C, MATLAB, LabView gibi birçok farklı aracı kullanarak gerçekleştirilmiş çok sayıda web tabanlı eğitimsel araçlar kullanılmaktadır [3-8].

Yapılan literatür taramasında denetleyici alan ağlarının web tabanlı eğitimine yönelik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bununla birlikte denetleyici alan ağlarına yönelik olarak çeşitli simülasyon uygulamaları ve yerel olarak çalışan benzetim çalışmaları mevcuttur. Tünel denetleyici alan ağlarının eğitime yönelik yerel (local) olarak çalışan benzetim yazılımı geliştirmiştir. Bu yazılım da kullanıcı mevcut CAN ağını inceleyebilmekte ve yeni bir ağ oluşturabilmektedir [9]. Bayılmış ve arkadaşları ayırık olay simülasyon tekniğini kullanarak OPNET Modeller simülöründe CAN düğümleri ve ağ yapısını modellemiş ve farklı koşullar altında simülasyonunu gerçekleştirmiştir. Bu çalışmayı kullanabilmek için ticari bir yazılım olan OPNET simülörünü gerekmektedir [10]. Matsumara ve arkadaşları ise açık kaynak kodlu OMNeT++ simülöründe CAN ağını modellemiş ve simüle etmişlerdir [11]. MATLAB'ın denetleyici alan ağı simülasyonu için CAN Toolbox desteği bulunmaktadır [12]. Salcianu ve arkadaşları LABVIEW ile yağmur algılama sistemi için CAN simülörünü geliştirmiştir [13]. Masaüstü bir uygulama olan RTaW-Sim simülörünü ile denetleyici alan ağı simülasyonu ve konfigürasyonu gerçekleştirilebilmektedir [14]. Asaduzzaman ve arkadaşları RTaW-Sim simülörünü kullanarak otomotiv uygulamaları için denetleyici alan ağının

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: cbayilmis@sakarya.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 455-460

simülasyonunu gerçekleştirmişlerdir [15]. MPS-CAN analizörü ile denetleyici alan ağındaki mesajlar analiz edilebilmektedir [16].

Bu çalışmada, endüstriyel otomasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan denetleyici alan ağlarının çalışmasını gösteren web temelli eğitimsel bir arayüz sunulmaktadır. CANWEB olarak adlandırdığımız bu web temelli arayüz ile denetleyici alan ağları (CAN) hakkında genel bilgi sahibi olunmakta, örnek bir uygulama üzerinde denetleyici alan ağ haberleşmesinin temel çalışma prensipleri öğrenilmekte ve kullanıcının yeni bir CAN ağ oluşturması ve benzetimini gerçekleştirmesi sağlanabilmektedir.

Makalenin ikinci bölümünde denetleyici alan ağları hakkında temel bilgiler verilmektedir. Üçüncü bölümde ise denetleyici alan ağlarının eğitimi amaçlı geliştirilen CANWEB'in tasarımı ve kullanımı sunulmaktadır.

2. DENETLEYİCİ ALAN AĞI (CONTROLLER AREA NETWORK)

Denetleyici Alan Ağı, bir araç içerisinde bulunan elektronik kontrol birimleri arasındaki haberleşmeyi sağlamak üzere 80'lerin başlarında Robert Bosch GmbH firması tarafından geliştirilmiştir [17]. Her ne kadar başlangıçta yalnızca otomotiv uygulamaları için tasarlanmış olsa da yüksek hız, düşük maliyet, yüksek başarımlı gibi nitelikleri sebebiyle çok kısa zamanda endüstriyel ortamlarda kullanılan veri yolları arasındaki yerini almıştır. CAN robot uygulamaları, akıllı bina, laboratuvar otomasyonu, akıllı sensör uygulamaları gibi çok geniş uygulama alanına sahiptir [10, 18].

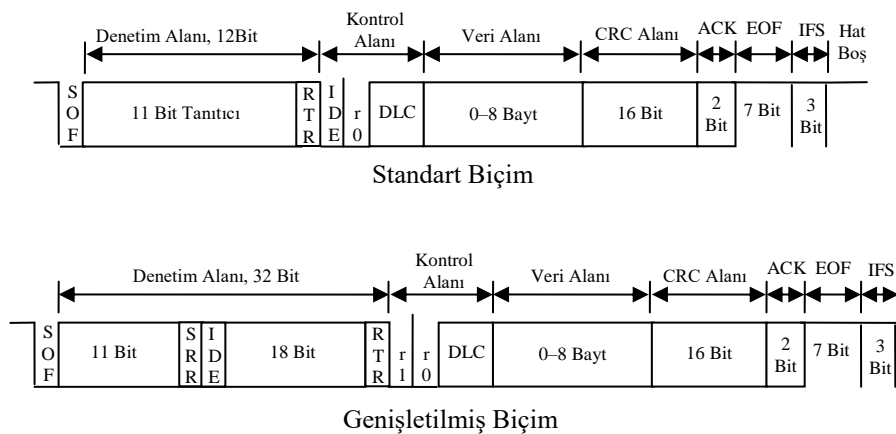
CAN çarpışmayı çözme ve gerçek zamanlı uygulamaları gerçekleştirme amacıyla tanıtıcı alan üzerinde öncelik esasına dayalı olan Taşıyıcı Duyarlı Çoklu Erişim/Mesaj Öncelik Denetimli Çarpışma Sezme (Carrier Sense

Multiple Access/Collision Detection with Arbitration on Message Priority, CSMA/CD+AMP) protokolünü kullanan bir seri haberleşme protokolüdür.

Diğer sistemlerden farklı olarak denetleyici alan ağına bağlı düğümler herhangi bir adres bilgisine sahip değildir. Bunun yerine CAN düğümlerin ürettikleri her bir mesaj, tüm ağ içerisinde tek olan bir tanıtıcı (identifikatör) bilgisine sahiptir. Bu tanıtıcı bilgisi üretilen mesajların iletim önceliğini ve mesajların kabul/reddedilmesini belirler. Tanıtıcı alanın boyutu kullanılan CAN versiyonuna göre değişiklik gösterir. CAN 2.0A 11 bit, CAN 2.0B ise 29 bit tanıtıcı alana sahiptir. CAN 2.0A ile 2^{11} adet farklı mesaj tanımlamak mümkündür. Düşük değerli tanıtıcı bilgisine sahip mesaj ağ içerisinde daha yüksek önceliğe sahiptir. En yüksek öncelikli mesaj herhangi bir kesme olmaksızın iletilmeyi garanti eder. Şekil 1'de denetleyici alan ağında kullanılan veri çerçeve biçimleri görülmektedir [10-18]. Denetleyici alan ağları hakkında detaylı bilgi [18] bulunmaktadır.

3. CANWEB'İN TASARIMI VE KULLANIMI (DESIGN AND USE OF CANWEB)

Denetleyici alan ağlarının eğitimini ve anlaşılmasını kolaylaştırmayı amaçlayan web tabanlı eğitimsel arayüzünün gerçekleştirilmesinde Adobe Flash CS5 ve Actionscript 2 kullanılmıştır. CANWEB arayüzü örnek bir uygulamayı incelemeye ve yeni bir uygulama geliştirmeye imkan veren iki temel kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda CAN'ın daha iyi öğrenilebilmesi için hazır bir sistem örnek uygulama olarak verilmekte ve çalışması animasyonlar ile gösterilmektedir. İkinci kısımda ise parametreleri kullanıcı tarafından girilen yeni bir CAN ağ oluşturulabilmekte ve benzetimi gerçekleştirilebilmektedir.



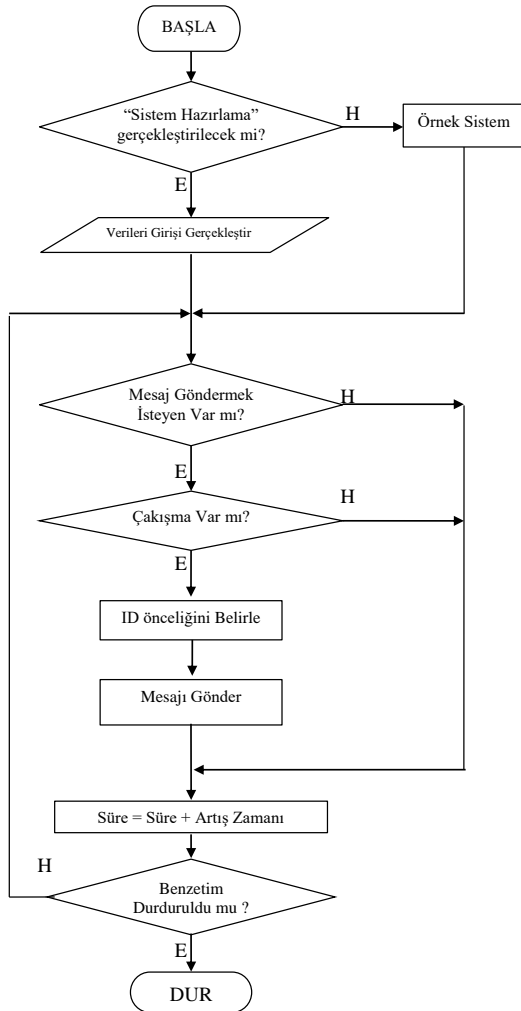
SOF: Çerçeve Başlangıcı
DLC: Veri Uzunluk Kodu
CRC: Çevrimli Fazlalık Sınaması
SRR: Yedek Uzak İstek Biti

RTR : Uzak İletim İstek
ACK: Alındı Bilgisi
EOF : Çerçeve Sonu
IFS : Çerçeveler Arası Boşluk

IDE : Tanıtıcı Uzantı
r0 : Ayrılmış bittir, kullanılmamaktadır
r1 : Ayrılmış bittir, kullanılmamaktadır

Şekil 1. Standart (2.0A) ve Genişletilmiş (2.0B) CAN veri çerçeveleri (Standard (2.0A) and Extended (2.0B) CAN data frames) [18]

Şekil 2’de geliştirilen CANWEB arayüzünün çalışmasını gösteren akış diyagramı görülmektedir [19]. CANWEB arayüzü kullanıcıya ilk olarak yeni bir sistem hazırlama ya da örnek bir sistem üzerinde çalışma seçeneği sunmaktadır. Eğer kullanıcı yeni bir sistem hazırlayacak ise o sisteme ait veri girişinde bulunmaktadır. Örnek sistem üzerinde CAN ağının çalışmasını inceleyecek ise önceden tanımlanmış mesaj sayısı, özellikleri vb. veri girişlerine göre sistem çalışmaktadır. Bu seçim sonrası CANWEB, CAN çalışma prensibine uygun olarak mesaj göndermek isteyen düğümleri sorgulamakta ardından mesaj gönderim aşamasında çakışma durumunu kontrol etmektedir. Eğer çakışma durumu meydana geldiyse CAN mesajın tanıtıcı alanının öncelik seviyesine göre mesaj gönderimini gerçekleştirmektedir. CANWEB arayüzü çalışma esnasında kullanıcı tarafından girilen simülasyon süresinin tamamlanıp, tamamlanmadığını da kontrol etmektedir.



Şekil 2. Tasarlanan web arayüzü akış diyagramı (Flow chart of the designed web interface)

Şekil 3’de CANWEB arayüzü ana sayfası görülmektedir. Ana sayfada 5 farklı buton bulunmaktadır. CANWEB arayüzünün açılış sayfası olan ana sayfada CAN hakkında bilgi verilmektedir. **Hakkında** butonu

tıklandığında gelen sayfada ise WEBCAN arayüzünün çalışması anlatılmaktadır. Denetleyici alan ağlarının çalışmasını anlamaya katkıda bulunmak amacıyla mevcut bir uygulama **Örnek Sistem** sayfasında gelmektedir. **Sistem Hazırlama** butonu tıklandığında gelen sayfada ise kullanıcının yeni bir CAN sistemi oluşturması için gerekli istasyon ve mesaj sayıları, mesaj tanımlama biti gibi bilgilerin girilebileceği ve kullanıcıya özgü oluşturulan ağın benzetimi gerçekleştirilmektedir. İletişim sayfasında ise kişisel iletişim bilgileri verilmektedir.



Şekil 3. CANWEB arayüzü ana sayfası (CANWEB interface main page)

3.1. Örnek Sistem (Example System)

Şekil 4’te denetleyici alan ağlarının çalışmasının daha kolay anlaşılabilmesi amacıyla tanımlanan örnek sisteme ait giriş sayfası görülmektedir. Örnek CAN ağı olarak bir araç içerisindeki haberleşme sistemi modellenmiştir. Bu sayfada ile olarak örnek sistemi oluşturan düğümler, düğümlerin ürettiği mesaj sayıları ve arayüzdeki diğer değişkenler tanıtılmaktadır. Sayfanın altındaki “Örnek Ekranı Git” butonu ile örnek sisteme ait özelliklerin tanıtıldığı sayfaya gidilmektedir.



Şekil 4. CANWEB arayüzü örnek sistem giriş sayfası (CANWEB interface example system entrance page)

Örnek sisteme ait CAN ağı Motor, Fren, Radyatör, Karbüratör, Yağ Filtresi olmak üzere 5 adet

düğümünden/istasyondan oluşmaktadır (Şekil 5). Şekilde de görüldüğü üzere Motor ve Fren düğümleri 2’şer adet diğer düğümler ise 1’er adet CAN mesajı üretmektedir. ID (Identifier) sütunu, düğümlerin CAN mesajlarının tanıtıcı bilgisini tutmaktadır. RT başlıklı sütun ise her mesajın ortalama ne kadar sürede bir üretileceğini (mesaj üretme sıklığı) göstermektedir. Her mesaj satırındaki diğer düğüm isimlerinin bulunduğu sütunlar ise üretilen mesajın kimler tarafından alınacağını (filtreleneceğini) göstermektedir. Örnek ağ içerisinde Fren düğümüne ait 1 numaralı mesaj 2 ID (öncelik) değerine sahiptir ve ağ içerisinde en düşük ID değerine sahip olduğundan en yüksek öncelikli mesajdır. Aynı anda diğer düğümlerde mesaj gönderse dahi Fren düğümüne ait bu mesaj gönderim önceliğine sahiptir. Ayrıca bu mesaj Motor ve Radyatör tarafından alınmaktadır.



NODE	MNO	ID	RT	Motor	Fren	Rad.	Karb.	Yağ F.
Motor	1	5	2		✓	✓		
Motor	2	9	3				✓	
Fren	1	2	4	✓		✓		
Fren	2	6	5					✓
Radyatör	1	8	7		✓			
Karbüratör	1	7	9					✓
Yağ F.	1	3	11		✓		✓	

Şekil 5. CANWEB arayüzü örnek sistem bilgileri (CANWEB interface example system information)

Şekil 5’teki sayfada “Sistem İzleme Ekranı” sekmesine tıkladığında örnek sistemin çalışmasının izlenebileceği sayfa gelmektedir. Şekil 6’da örnek sistemin çalışmasına ait bir görüntü görülmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere örnek sistemi oluşturan 5 adet düğüm bus topoloji yapısında bağlanmıştır. Simülasyon süresinde mesaj

üretim zamanı gelen düğümlere ait mesajlar ikili (binary) formda ve mesaj (lojik) sinyal olarak görülmektedir. “Süre” kısmında simülasyon süresi ve “Yavaş”, “Orta”, “Hızlı” butonları ile de simülasyonun çalışma hızı ayarlanabilmektedir.



Şekil 6. CANWEB arayüzü örnek sistem çalışma sayfasından bir görüntü (A picture of example system run page of CANWEB interface)

3.2. Yeni Bir Sistem Hazırlama (A New System Prepare)

CANWEB arayüzünde “Sistem Hazırlama” butonuna tıklanıldığında kullanıcı tarafından yeni bir sistem oluşturma işlemi Şekil 7’de görüldüğü üzere CAN ağı oluşturan düğüm sayısının tanımlanmasıyla başlamaktadır. Şekil 7.a’da CAN ağı düğüm sayısı 5 girilmiş ve ardından “onayla” butonuna basılarak gelen sayfada 5 adet düğüm isimleri ile düğümlere ait mesaj sayıları girilmektedir. Şekil 7.b’de de görüldüğü üzere AAA, CCC, DDD düğümleri 1’er BBB ve EEE isimli düğümler ise 2’şer CAN mesajı ürettikleri varsayılarak değerler ilgili alana girilmiştir. Bir sonraki aşama için yine “ONAYLA” butonuna basılmalıdır.



Şekil 7. CANWEB arayüzü yeni sistem hazırlama düğüm sayısı (a) ve mesaj sayısı (b) girişi (Input number of node (a) and number of message (b) of a new system preparing page in CANWEB interface)

Sistemi oluşturan düğüm ve her bir düğümün sahip olacağı mesaj sayısı belirlendikten sonra bir sonraki aşamada sistemdeki her bir mesajın kime gönderileceği, hangi mesaj id'ye sahip olacağı ve hangi istasyonun hangi mesajı kaç saniyede bir göndereceği gibi özellikleri tanımlanması gerekmektedir. Tüm bu işlemler Şekil 8'de görülen sayfa yardımıyla yapılabilmektedir. Şekilde 1 numara ile gösterilen RT ile tanımlı alana mesaj üretme sıklığı (saniyede kaç mesaj üretileceği), 2 numara ile gösterilen ID ile tanımlı alana ilgili mesajın önceliğini belirten tanıtı alan bilgisi girilir. En küçük ID'ye sahip mesaj ilk gönderilme önceliğine sahiptir. Ayrıca CAN ağlarda aynı ID'ye sahip birden fazla mesaj olamaz. Kullanıcı aynı ID değeri girdiğinde sistem bir uyarı mesajı vermektedir. Son olarak 3 numara ile gösterilen alanda da hangi düğümün hangi mesajının ağdaki hangi düğümlere gönderileceği işaretlenir. Örneğin BBB düğümünün 2 nolu mesajı yalnızca EEE düğümü tarafından alınmaktadır.



Şekil 8. CANWEB arayüzü yeni sistem hazırlama sayfası girişi (Data input a new system preparing page in CANWEB interface)

Şekilde kullanıcı yeni sistem konfigürasyonunu tamamladığında "ONAYLA" butonuna bastığında sistem çalışmasını izleme sayfasına geçilmektedir. Şekil 9'da çalışmakta olan sistemin 6. saniyesindeki ekran görüntüsü görülmektedir. Şekilde 1 numaralı alanda düğüm isimleri ve düğümlere ait mesaj numarası ve tanıtıcı alan (ID) bilgisi görülmektedir. 2 numaralı kısımda ise veriyolunda gönderilmekte olan mesajın ikili (binary) sistemdeki karşılığı, 3 numaralı alanda ise mesajın sinyal seviyesi şekli görülmektedir. 4 numaralı alanda ise veriyoluna erişim hakkını kazanan (gönderici) düğümün veriyoluna koyduğu mesaj paketi temsil edilmiştir.



Şekil 9. CANWEB arayüzü yeni sistem hazırlama çalışma sayfasından bir görüntü (A picture of a new system preparing page of CANWEB interface)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada endüstriyel haberleşme sistemlerinden biri olan denetleyici alan ağlarının çalışmasının daha iyi anlaşılabilmesine katkı sağlayacak bir web tabanlı eğitimsel arayüz ve benzetim uygulaması sunulmuştur. Geliştirilen CANWEB arayüz ile kullanıcı örnek bir sistemin çalışmasını inceleyebildiği gibi kendisi yeni bir CAN ağı oluşturabilmektedir. Örnek sistem ile kullanıcı CAN protokolünün çalışma mantığını arayüz ile sağlanan görsellik ve animasyonlar aracılığıyla kolayca kavrayabilmektedir. CANWEB'in sistem hazırlama kısmı ile kullanıcı kendi CAN ağını adım adım oluşturabilmekte ve çalışmasını gözlemleyebilmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Stefanovic M., Matijevic M, Cvijetkovic V., Simic, V. "Web-based laboratory for engineering education", *Computer Applications in Engineering Education*, 18: 526-536, (2010).
- [2] Balamuratlıthara B., Woods P. C., "Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab.", *Computer Applications in Engineering Education*, 17: 108-118, (2008).
- [3] Kacar S., Bayılmış C., "A Web-Based Educational Interface for an Analog Communication Course Based on MATLAB Builder NE With WebFigures", *IEEE Transactions on Education*, 56(3): 346-354, (2013).
- [4] Colak, I, Irmak E, Kabalci E, Issi F, "Design and implementation of a remote laboratory platform using MATLAB Builder for NE", *Computer Applications in Engineering Education*, 22: 617-629, (2014).

- [5] Colak, I, Demirbaş, Ş., Sağıroğlu Ş, Irmak E, “A Novel Web-Based Laboratory for DC Motor Experiments”, *Computer Applications in Engineering Education*, 19: 125-135, (2011).
- [6] Sönmez E., Kaçar S., “Kontrol Sistemleri Dersi İçin Matlab Builder NE ve Asp.Net Tabanlı Web Laboratuvarı Tasarımı”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (2016).
- [7] Kacar S., Bayilmis C., Cetin O., “A web laboratory using MATLAB Builder NE for computer image processing”, *The Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 22(1): 166-175, (2014).
- [8] Djordjevic J. Nikolic B., Milenkovic A., “Flexible Web-Based educational system for teaching computer architecture and organization”, *IEEE Transactions on Education*, 48(2): 264-273, (2005).
- [9] Tüncel S., “Denetleyici Alan Ağı Endüstriyel İletişim Protokolünün Eğitim Amaçlı Benzetimi”, *Yüksek Lisans*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002).
- [10] Bayılmış C., Ertürk İ., Çeken C., Özçelik İ., "Modelling Controller Area Networks Using Discrete Event Simulation Technique", *Complex Computing Networks (CCN05)*, İstanbul, Türkiye, 353-358, (2005).
- [11] Matsumara, J, Matsubara, Y, Takada, H, Oi, M, Toyoshima, M, Iwai, A, “A Simulation Environment based on OMNeT++ for Automotive CAN-Ethernet Networks”, *Proceedings of the 4th International Workshop on Analysis Tools and Methodologies for Embedded and Real-time Systems (WATERS2013)*, Paris, France, 1-6, (2013).
- [12] <http://www.mathworks.com/discovery/can-network.html>
- [13] Salcianu M, Foşalau C, Hariton A, “A New Controller Area Network Simulator For A Rain Sensing System Using LABVIEW”, *Bulletin of the Polytechnic Institute of Jassy. Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics*, 5: 69-78, (2011).
- [14] <http://www.realtimeatwork.com/software/rtaw-sim/>
- [15] Asaduzzaman A., Bhowmick S., Moniruzzaman M., “Design and evaluation of controller area network for automotive applications”, *American Journal of Embedded Systems and Applications*, 2(4): 29-37, (2014).
- [16] Mubeen S., Maki-Turja J., Sjödin M., “MPS-CAN analyzer: Integrated implementation of response-time analyses for Controller Area Network”, *Journal of Systems Architecture*, 60: 828-841, (2014).
- [17] “CAN Specification V 2.0”, Robert Bosch GmbH, (1991).
- [18] Lawrenz W., “CAN System Engineering:from Theory to Practical Applications”, *Springer-Verlag*, (1997).
- [19] Yıldırım Z., “Denetleyici Alan Ağları İçin Web Tabanlı Eğitimsel Arayüz Tasarımı ve Uygulaması”, *Yüksek Lisans*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).

Bina Bakım Onarım Ödeneklerinin Etkin Kullanımı Maksadıyla İhale Bedelini Etkileyen Faktörlerin Yapay Sinir Ağları ve Linear Regresyon Yöntemleri ile Belirlenmesi

Mustafa YILMAZ^{1*}, Recep KANIT², Mürsel ERDAL², Serkan YILDIZ¹, Adem BAKIŞ¹

¹Kara Harp Okulu, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Türkiye

(Geliş / Received : 24.04.2016 ; Kabul / Accepted : 08.07.2016)

ÖZ

Kısıtlı mali kaynaklar nedeniyle kamu binaları bakım - onarım işleri için planlanan ödeneklerin planlama döneminde kullanılması büyük önem arz etmektedir. Ancak, personelin iş yükü, bakım onarım işlerinin bünyesinde pek çok belirsizlik barındırması gibi nedenlerle sağlıklı yapılan birinci keşif bedelleri üzerinden tahsis edilen ödenekler, çoğunlukla yaklaşık maliyetin altında kalmakta, bu ise ilave ödenek tahsisi için işlerin geciktirilmesine veya işin tamamen yapılamayarak ödeneğin bütçeye iade edilmesine neden olmaktadır. Öte yandan, çoğu zaman sözleşme bedellerinin yapılan ihale indirimleri nedeniyle genellikle ilk ödenek sınırları içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu çalışmada, kısıtlı bakım onarım ödeneklerinin etkin kullanımını sağlamak maksadıyla, teklif vermeyi etkileyen yaklaşık maliyet bedeli, işin yapıldığı il, idare, onarımın tipi, ihale tarihi, işin süresi ve geçerli teklif sayısı gibi parametreler etkisinde ihale bedellerinin tahminine çalışılmıştır. Bu kapsamda bir kamu kurumunun 2015 yılında gerçekleştirdiği muhtelif bakım onarım faaliyetlerine ait 211 ihale verisi regresyon-korelasyon yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Analiz sonuçları Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemiyle de test edilerek karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışma sonuçlarının, kamu binalarının bakım onarımı için planlanan ödeneklerin daha etkin ve verimli kullanılabilmesinde, ilgili kamu görevlilerine yol göstereceği değerlendirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İnşaat Sektörü, Kamu Binaları, Regresyon Analizi, Yapay Sinir Ağları.

Determination of The Factors Effecting The Tender Price by way of Artificial Neural Networks and Linear Regression Analyses in order to Utilize Maintenance and Repair Funds More Effectively

ABSTRACT

The funds allocated for the maintenance and repair of the public buildings must be spared as scheduled, because of the limited financial resources. However, because of the uncertainties embodied within the very nature of the maintenance and repair works, and the working load, most of the time, the funds based on the untruth-worthy bill of quantities remain below the approximate cost and this causes delays in the works or a complete collection of projects and returning the allocated funds back to the budget eventually. On the other hand, due to discounts, the tender prices usually remain within the limits of the funds allocated at the very beginning. In this paper, for the purpose of using the limited funds allocated for the maintenance and repair works effectively, by taking the factors effecting the bidding into consideration such as; approximate cost, and the city where the work is to be done, and contracting authority, and repair type, and bidding date, and duration of the work, and number of accepted bids, the correct estimates of contract prices have been studied. In this regard, the 211 bidding data concerning various maintenance and repair projects carried out by a public institute in 2015 have been analyzed using regression-correlation method. The results of the analysis have been tested by way of Artificial Neural Networks (ANN) and some comparisons made. It has been shown that the results of the study will lead the way for public officials in utilizing the funds allocated for the maintenance and repair of public buildings more effectively and efficiently.

Keywords: Construction Sector, Public Buildings, Regression Analyses, Artificial Neural Network.

1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Türkiye’de kamu yapı stoğu gün geçtikçe yaşlanmakta ve mevcut binaların bakım - onarım ve idamesi için her

geçen gün analitik bütçenin “03.8 Gayrimenkul Mal Bakım Onarım Giderleri” Ekonomik Sınıflandırma Kodu (ESK)’ndan daha fazla kaynak aktarılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Ödenek yetersizliği nedeniyle onarım ihtiyaçları zamana yayılmakta, zamanında giderilemeyen onarım ihtiyaçları nedeniyle de her geçen gün ilave hasarlar oluşmakta ve onarım maliyetleri gün geçtikçe

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: myilmaz@kko.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 461-470

artmaktadır. Diğer taraftan çeşitli nedenlerle tahsis edilen ödeneklerin zaman zaman kullanılmadığı ve bütçeye geri iade edildiği de görülmektedir. Ödeneklerin etkin kullanılmama nedenlerinin başında ödenek planlamasına esas keşiflerin doğru ve eksiksiz hazırlanamaması sonucunda yaklaşık maliyetlerin tahsis edilen ödenegin üzerinde çıkması ve ilave ödenek tahsis edilemediği veya tahsis süreçleri uzadığı için mali yıl içinde ihaleye çıkılmaması olduğu görülmektedir. Bazen de ödenek sınırları içerisinde kalabilmek maksadıyla ihtiyaç olmasına rağmen bazı imalat kalemlerinin proje kapsamından çıkarıldığı ve onarım sonrasında problemin tam anlamıyla çözüme kavuşturulmadığı durumlarla karşılaşmaktadır. Öte yandan edinilen tecrübeler, yaklaşık maliyeti tahsisli ödenegini aşan birçok bakım onarım işinde ilave ödenek temin edilerek gerçekleştirilen ihale sonrasında ilk ödenek sınırları dâhilinde bir bedel üzerinden sözleşme akdedildiğini göstermektedir.

Bu çalışmada bakım onarım ödeneklerinin daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamak maksadı ile bakım onarım işlerinde ihale bedellerinin tahminine odaklanılmıştır. Literatür taramasıyla elde edilen inşaat ihalelerinde teklif verme kararına etki eden ve kâr marjını etkileyen faktörlerden hareketle; yaklaşık maliyet bedeli, işin yapıldığı il, idare, onarımın tipi, ihale tarihi, işin süresi ve geçerli teklif sayısı gibi parametrelerin bakım-onarım projelerinde ihale bedelleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmada kullanılmak üzere Kamu İhale Kurumu (KİK)'nin resmi internet sitesinden, Milli Savunma Bakanlığı (MSB) tarafından Bütçe Masraf Planı (BMP) 2015 kapsamında gerçekleştirilen kamu binalarının muhtelif bakım onarım faaliyetlerine ait 211 ihale verisi temin edilmiştir. Elde edilen veriler SPSS-21 (Statistical Packages for the Social Sciences/Sosyal Bilimler için İstatistik Paketi) programı yardımıyla regresyon-korelasyon yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bulunan sonuçlar MatlabR2013b (Matrix Laboratory/Çok Paradigmali Sayısal Hesaplama Yazılımı) programında "nntool" modülü yardımıyla da Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemiyle de test edilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır.

2. KAMU BİNALARI BAKIM – ONARIM FAALİYETLERİ (MAINTENANCE AND REPAIR WORKS FOR PUBLIC BUILDINGS)

2.1. Yasal Düzenlemeler (Legislative Regulations)

Mevcut kamu binalarının bakım - onarım faaliyetleri; "bunların ekonomik ömürlerini ve değerlerini arttırmaya yönelik olmayan yenileme amaçlı bakım onarımlar dışında kalan ve doğrudan işletmeye yönelik düzenli olarak yapılması gereken bakım onarımlar" ile sınırlandırılmıştır[1]. Bu tanım kapsamında yapılan harcamalar belli bir limit dâhilinde bütçenin "cari harcamalar" kalemine gider kaydedilmiş, limiti geçen tutardaki bakım onarım harcamaları ise "sermaye" kalemine işlenmiştir. Analitik bütçenin 03.8 ESK'sı altında, yapı cinslerine göre bir takım alt kodlar

oluşturmak ve lojman, sosyal tesisler gibi bazı yapı cinsleri için yıl içinde sarf edilebilecek ödenekleri sınırlandırmak suretiyle mevcut binaların bakım onarımına yapılan harcamalar bütçe kanunu ile disiplin altına alınmıştır.

Modernizasyon bütçelerinin rahatlatılması amacıyla mevcut kamu yapılarının periyodik bakım - onarım harcamalarına ayrılan payın azaltılması bu ödenegin planlanmasını daha da önemli hale getirmiştir. Envantere kayıtlı bir bina için kullanıcı kamu kurum/kuruluşu tarafından yapılan bakım onarım talebi üzerine bina, uzman teknik personel tarafından yerinde incelenerek onarım ihtiyacı tespit edilmekte ve bu aşamada konu hakkında teknik rapor ve ödenek planlamasına esas "Birinci Keşif" tanzim edilmektedir. Yerinde yapılan ölçümlere veya röleve projelerine istinaden çıkarılan metraj değerleri üzerinden yapılan kuruşlandırmaya "Birinci Keşif" veya "Ön Keşif" denilmektedir. Bu keşif tahmin, varsayım ve kabullere dayanılarak hazırlanmakta ve dolayısıyla planlama, projelendirme ve ihale hazırlık aşamalarında bilgi seviyesi değiştikçe keşif değeri de değişebilmektedir. Bakım onarım ödeneklerinin yerinde ve etkin kullanılması, ödenek planlamasına esas teşkil eden birinci keşiflerin doğru ve eksiksiz hazırlanmasıyla ilişkili görünmektedir. Ancak; ödenek tahsisine esas birinci keşifler belirsizliğin hüküm sürdüğü bir ortamda hazırlandığından maliyet tahmininin tutarlılığı keşfi yapan teknik personelin tecrübesiyle de yakından ilgili olmaktadır. Diğer taraftan onarım keşfi talep edilen bina sayısının çok fazla olması nedeniyle aşırı işgücü ihtiyacının ortaya çıkması, birinci keşiflerin hassas bir şekilde yapılmasını neredeyse imkânsız hale getirmektedir. Kısacası onarım işlerinde birinci keşfe dayalı ödenek tahsisi, bünyesinde pek çok belirsizliği barındıran ve doğası gereği isabet yüzdesi pek yüksek olmayan bir husus olarak ortaya çıkmaktadır. Böyle olmasına rağmen pek çok bakım onarım işinin ihale sonrası birinci keşfe göre tahsis edilen ödenegini aşmayan bir bedel üzerinden sözleşmeye bağlandığı görülmektedir.

Tahsis edilen ödenek ile ihale neticesi sözleşmeye bağlanan onarım işinin ihale bedeli arasındaki fark ne kadar az olursa, onarım işlerindeki performans o kadar yüksek olmaktadır. Ancak; 4734 sayılı Kamu İhale Kanununun "Temel İlkeler" başlıklı 5'nci maddesinin "Ödenegin bulunmayan hiçbir iş için ihaleye çıkılamaz" hükmü bu etkin kullanıma engel olarak algılanmaktadır. Bundan dolayı ihaleye esas yaklaşık maliyetin tahsisli ödenegini aşması durumunda, ya ilave ödenek talebinde bulunulmakta ya da onarım konusu işin bir kısmından sarf-ı nazar edilerek işin kapsamı daraltılmaktadır. Ülkenin o anki ekonomik durumuna ve rekabet şartlarına bağlı olarak her ihalede değişen oranlarda indirim yapılmakta ve sonuçta bir taraftan tahsisli ödenegin ihale indirimine denk gelen kısmı harcanmadan iade edilme diğer taraftan da ihtiyacın bir kısmı ödenek yetersizliği sebebiyle ihale kapsamından çıkarılma gibi çelişkili bir durumla karşı karşıya kalınmaktadır. Her ihale sonrası artan ödenekler sıradaki onarıma tahsis edilerek yeniden

harcanmaya çalışılmakta ve mevcut binaların bakım onarımları etkin ve ekonomik olarak zamanında yapılamamaktadır.

2.2. İhale Stratejileri (Bidding Strategies)

Bir taraftan ödeneğin yetersiz kalması nedeniyle o yılın bütçesinde ödenek planlanan bazı bakım onarım işlerinin ertelenmesi ve zaten kısıtlı olan ödeneğin harcanmayarak bütçeye iade edilmesi söz konusu iken, diğer taraftan ilave ödenek temin edilerek gerçekleştirilen birçok işte ihale sonrasında ilk ödenek sınırları dâhilinde bir bedel üzerinden sözleşme akdedildiği görülmektedir. Buradan yola çıkılarak, ödeneği yaklaşık maliyetin altında kalan işlerde ihaleye çıkılıp çıkılmama kararının verilebilmesini etkileyecek olan ihale bedeline etki eden faktörlerin belirlenmesine çalışılmıştır. Literatürde inşaat ihalelerinde teklif vermeye etki eden faktörler incelendiğinde; teklif vermeye etki eden ve kar marjını etkileyen faktörlerin yeni yapı ya da onarım ayrımı

etkileyen faktörleri belirlenmiştir [4]. Shash ve Hadi (1993) yaptıkları bir başka çalışmayla Suudi Arabistan'da yüklenicilerinin kar marjını etkileyen faktörleri belirlemişlerdir[5]. Türkiye için teklif verme kararına etki eden faktörler Dikbaş (1995) tarafından araştırılmıştır[6]. Jarkas ve arkadaşları (2014) tarafından Katar'lı yüklenicilerin ihaleye teklif verme kararlarını etkileyen faktörler 5 ana faktör altında toplanarak önem derecelerine göre sıralanmıştır[7]. Oo ve arkadaşları (2010) yaptıkları çalışmada tasarladıkları karma modelle teklif stratejisi için önemli olan faktörleri belirlemişlerdir[8]. Bunların dışında da ihaleye teklif verme kararını etkileyen faktörlerin belirlenmesine yönelik çalışmalar yapılmış ve tespit edilen faktörler farklı ana faktörler altında toplanmıştır [9-11]. Hwang ve Kim (2015) tarafından yapılan bir çalışmada uluslararası ihalelerde teklif vermeye etki eden faktörler belirlenmiştir [12]. Bu parametrelerden öne çıkanlar Çizelge-1'de verilmiştir.

Çizelge-1. Teklif Vermeye ve Kar Marjına Etki Eden Faktörler

FAKTÖRLER	Ahmed ve Minkarah (1988) [2]	Ahmed (1990) [3]	Shash (1993) [4]	Shash ve Hadi (1993) [5]	Clough ve Sears (1994) [9]	Dikbaş (2007) [6]	Bagies ve Fortune (2006) [10]	Oo ve ark. (2010) [8]	Mübarek ve Means (2012) [11]	Jarkas ve ark. (2014) [7]	Hwang ve Kim (2015) [12]
Yaklaşık Maliyet Bedeli (İşin Büyüklüğü)	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
İşin Yapıldığı İl (Şantiyenin Yeri)	√	√	√		√	√	√		√	√	
İdare (Müşteri/İşveren)	√		√		√	√	√				√
Onarımın Tipi (İşin Tipi)	√		√		√	√	√	√	√	√	√
İhale Tarihi (İhale Zamanı)							√				√
İşin Süresi (Süre)	√		√	√			√			√	√
Geçerli Teklif Sayısı (Rakiplerin Katılma Durumu/Katılan Rakip Sayısı)	√	√	√				√	√		√	√

yapılmaksızın inşaat ihaleleri geneli için belirlendiği, isteklilerin çeşitli kategoriler altında toplanan farklı ancak birbiriyle bağlantılı parametreleri eşzamanlı değerlendirerek teklif verdikleri görülmektedir. Teklif vermeye etki eden faktörlerin belirlenmesine yönelik ilk çalışmalar Ahmed ve Minkarah (1988) tarafından ABD'de yapılmıştır [2]. Ayrıca Ahmed (1990) tarafından teklif verme mekanizmasını anlamaya yönelik yapılan bir çalışmada deterministik (proje, boyutu ve konumu) ve olasılık (riskler ve rekabet) boyutlu bir ihale metodolojisi önermiştir[3]. Daha sonra Shash (1993) tarafından İngiltere'de yapılan bir çalışmada teklif kararlarını

Yapılan çalışmaların bir kısmı bölgesel olmakla birlikte inşaat sektörünün karakteristik yapısından dolayı farklı çalışmalarda benzer faktörlerin dikkate alındığı görülmüştür. Bu çalışmalar; gelişen teknoloji, değişen sistemler, yenilenen kanun ve yönetmelikler, ülkelerin politik ve coğrafi konumu, anket ya da veri alınan kişilerin geneli yansıtmadaki göreceliği ve yıllara göre insanların bakış açılarındaki değişimin faktörlerin önemini belirleme etkili olduğunu göstermektedir.

3.MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

Araştırmada kullanılmak üzere KİK'in resmi internet sitesinden, MSB tarafından BMP 2015 kapsamında gerçekleştirilen kamu binalarının muhtelif bakım onarım faaliyetlerine ait ihale verileri temin edilmiştir. Örneklem için, ilgili bakanlığa bağlı farklı kurum/kuruluşlarda gerçekleştirilen 211 onarım faaliyeti, tamamen rastgele seçilmiştir. Bu onarım işlerine ait ihale numarası, işin

kodları, MSB Bölge Başkanlıkları sorumluluk bölgelerinde (Şekil-2) bizzat ilgili Bölge Başkanlığınca gerçekleştirilen ihaleler için idare bilgisine Bölge Başkanlığının konulu olduğu ilin plaka kodu (toplam 63 ad. onarım işi), bizzat kullanıcı kurum/kuruluş marifetiyle gerçekleştirilen ihaleler (148 ad. onarım işi) için de 99 girilmiştir. İhale tarihi olarak ihalenin gerçekleştirildiği ay girilmiştir.

Çizelge-2 (a). İhale Bedelleri

İhale Bedelleri (bin TL)	10-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-1.000	1.000-2.000
İhale Sayısı	90	59	26	10	11	14	1

Çizelge-2 (b). İhale Tarihleri

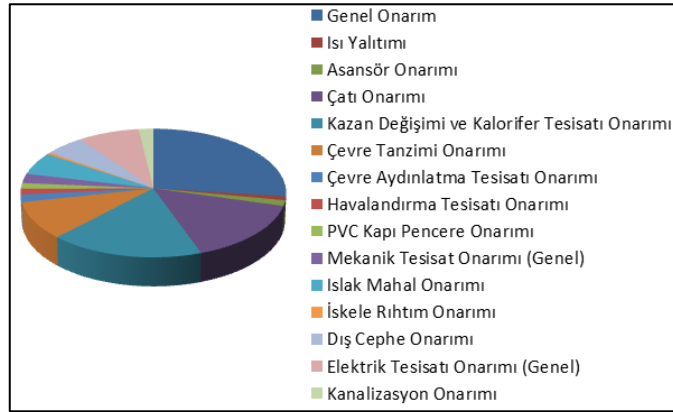
İhale Tarihi (Ay)	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık
İhale Sayısı	14	42	59	52	41	3	-

Çizelge-2 (c). İşlerin Süreleri

İşin Süresi (Takvim Günü)	10-30	31-45	46-60	61-75	76-90	91-120	121-150
İhale Sayısı	48	44	49	25	35	9	1

Çizelge-2 (d). Geçerli Teklif Sayıları

Geçerli Teklif Sayısı	1	2	3	4	5	6-10	11-15
İhale Sayısı	43	45	47	23	19	33	11



Şekil-1. Onarım Tipleri

yapıldığı yer (il), idare, işin adı, ihale tarihi, yaklaşık maliyeti, sözleşme bedeli, işin süresi, ihale dokümanı satın alan firma sayısı, toplam teklif sayısı ve geçerli teklif sayısı gibi ihale bilgilerine ulaşılmıştır. Söz konusu ihalelere ilişkin genel bilgiler Çizelge-2(a-d)'de sunulmuştur. İhale kapsamını incelenerek onarım tiplerine göre gruplandırılan işlerin dağılımları Şekil-1'de gösterilmiştir.

Elde edilen verilerin değerlendirilmesinde SPSS-21 analiz programı kullanılmıştır. Veriler programa aktarılırken işin yapıldığı yer (il) bilgisine illerin plaka



Şekil-2. Bölge Başkanlıklarının Sorumluluk Alanları ve İhale Sayıları

MSB tarafından BMP 2015 kapsamında gerçekleştirilen kamu binalarının muhtelif bakım onarım faaliyetlerine ait veriler, SPSS-21 programı yardımıyla regresyon-korelasyon yöntemi kullanılarak istatistiki yönden analiz edilmiştir. Bulunan sonuçlar Matlab R2013b programında “nntool” modülü yardımıyla da YSA yöntemiyle de test edilmiştir. Bu analizlerde kullanılan bağımsız parametrelerin belirlenmesinde teklif verme kararına etki eden ve kâr marjını etkileyen faktörlerden yararlanılmıştır [1-12].

Yurt dışı ve yurt içinde inşaat ihalelerinde teklif verme kararına etki eden ve kâr marjını etkileyen Çizelge-1’deki faktörlerden hareketle MSB’nin BMP 2015 ihale verilerinden; yaklaşık maliyet bedeli (işin büyüklüğü), işin yapıldığı il (şantiyenin yeri), idare (müşteri/işveren), onarımın tipi (işin tipi), ihale tarihi (ihale zamanı), işin süresi (süre) ve geçerli teklif sayısı (rakiplerin katılma durumu/katılan rakip sayısı) parametrelerinin ihale bedelini etkileyen bağımsız değişken olarak atanması uygun görülmüştür.

3.1. Lineer Regresyon Analizi (Linear Regression Analyses)

Regresyon analizi, iki ya da daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan analiz metodudur. Eğer tek bir değişken kullanılarak analiz yapılıyorsa buna tek değişkenli regresyon, birden çok değişken kullanılıyorsa çok değişkenli regresyon analizi olarak isimlendirilir. Regresyon analizi ile değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı ve gücü hakkında bilgi edinilebilmektedir. Değişkenler arasındaki ilişkiler regresyon analizi ile ölçülmektedir. Regresyon analizi ile tanımlayıcı istatistikler yanında çıkarımsal istatistikler de yapılabilmektedir. Normal dağılımlı iki değişken arasında doğrusal ilişki olup olmadığı “Basit Lineer Regresyon Analizi” ile test edilmektedir. Ancak birbirleriyle de etkileşim içinde olan birden fazla değişkenin bir değişkeni etkilediği durumlarda tek değişkenli regresyon analizi yerine çok değişkenli regresyon analizi yapılmaktadır.

Çok değişkenli regresyon analizinde, bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasında doğrusal ilişki matematiksel olarak aşağıdaki şekilde modellenmektedir.

$$Y = \alpha + \beta_1\chi_1 + \beta_2\chi_2 + \beta_3\chi_3 + \dots + \beta_n\chi_n \quad (1)$$

3.2. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)

YSA; insan beyninin sinir hücrelerinden oluşmuş katmanlı ve paralel olan yapısının tüm fonksiyonlarıyla beraber sayısal dünyada gerçeklenmeye çalışılan modellenmesidir. YSA tahminleme, sınıflandırma, kümeleme gibi birçok karmaşık problemin çözümünde kullanılan oldukça etkili bir yöntem olarak bilinmektedir. YSA’nın en önemli özelliği karmaşık sistemlerin geçmiş bilgilerinden yola çıkarak örnek üzerinde öğrenme yolu ile probleme çözüm getirebilmesidir [13]. YSA, paralel olarak bağlanmış biyolojik sinir sistemine benzeyen basit elemanlardan oluşmaktadır. Ağın fonksiyonunu bu elemanlar arasındaki büyük çaplı bağlantılar oluşturmaktadır. Elemanların birbirleriyle bağlandıkları

ağırlık değerlerinin ayarlanarak belirli bir fonksiyonun gerçekleştirilmesi için ağı eğitilmesi sağlanmaktadır. Böylece belirli bir girdiye karşılık ağ bir çıktı üretmektedir [14].

YSA yardımıyla birçok probleme çözüm bulunabilmektedir. Her problemin çözümüne dönük farklı ağ yapıları kullanılmaktadır. Bu çalışmada özellikle sınıflandırma, tahminleme gibi problemlerde oldukça sık kullanılan [15] Çok Katmanlı Algılayıcı Modeli (ÇKA) kullanılmıştır.

3.3. Korelasyon (Correlation)

4734 sayılı kanunla ödeneği olmayan işlerin ihale edilmesini yasaklayan hükmün ihale bedelini karşılayacak yeterli ödeneği bulunmayan işleri kapsamı gerektiği gerçeğinden hareketle bu çalışma kapsamında mevcut bütçe dâhilinde gerçekleştirilebilecek maksimum onarım tutarının belirlenmesi ve bu şekilde onarım faaliyetlerindeki etkinliğin artırılması hedeflenmiştir.

Bunun için ihale bedeli, yaklaşık maliyet, idare, ihale tarihi, işin süresi, yeri, tipi ve geçerli teklif sayılarının birbirleriyle ilişkileri incelenmiş ve ihale bedeli ile yaklaşık maliyet, işin süresi, idare, ihale tarihi ve geçerli teklif sayısı arasında anlamlı; onarımın tipi ile de aralarında daha zayıf bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. İhale bedeli ile onarımın yeri arasında anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir (Çizelge-3).

Çizelge-3’deki korelasyon matrisi, bağımlı değişken olan ihale bedeli ile yaklaşık maliyet, işin süresi, idare, ihale tarihi, geçerli teklif sayısı, işin yeri ve onarım tipi değişkenlerinin her biri arasındaki korelasyonu gösterdiği gibi aynı zamanda, bağımsız değişkenlerin birbiriyle olan korelasyonunu da göstermektedir. Bağımsız değişkenler arasında korelasyon değerinin yüksek olması, değişkenlerin aynı türden bilgiler içerdiği ve bu her bir değişkenin salt etkisinin belirlenmesinin zor olacağı anlamına gelmektedir. Regresyon analizi sonuçlarının daha doğru olması için bağımsız değişkenler arasında düşük korelasyon tercih edilmektedir[16]. Çizelge 3’e bu açıdan bakıldığında, yaklaşık maliyet ile diğer tüm bağımsız değerler arasında düşük de olsa korelasyon olduğu, onarım tipi ve geçerli teklif sayısı ile diğer bağımsız değişkenler arasında anlamlı bir ilişki olmadığı ancak idare, işin süresi ve ihale tarihi arasında belirli bir oranda korelasyon olduğu görülmektedir. İhale bedeli üzerinde yaklaşık maliyetin çok büyük pozitif (aynı yönlü) bir etki yarattığı, ihale makamı ile ihale tarihinin negatif (ters yönlü), işin süresi ile geçerli teklif sayısının pozitif yönlü ancak çok sınırlı bir etkisinin olduğu, onarım tipinin ise anlamlı bir etkisinin olmadığı görülmektedir. Yapılacak regresyon analizi için ihale bedeli bağımlı değişken onarımın yeri dışındaki diğer değişkenler de (yaklaşık maliyet, işin süresi, idare, ihale tarihi, geçerli teklif sayısı ve onarım tipi) bağımsız değişken olarak belirlenmiştir.

Çizelge-3. Örneklem Korelasyon Matrisi

	İhale Bedeli	Yaklaşık Maliyet	İdare	İhale Tarihi	İşin Süresi	Geçerli Teklif	Onarımın Tipi	Onarımın Yeri
İhale Bedeli	1	,983**	-,365**	-,271**	,466**	,209**	-,138*	-,099
Anlamlılık (Pearson)		,000	,000	,000	,000	,002	,046	,151
N	211	211	211	211	211	211	211	211
Yaklaşık Maliyet	,983**	1	-,351**	-,291**	,459**	,241**	-,122**	-,082
Anlamlılık (Pearson)	,000		,000	,000	,000	,000	,077	,237
N	211	211	211	211	211	211	211	211
İdare	-,365**	-,351**	1	,332**	-,560**	-,107	-,081	,417**
Anlamlılık (Pearson)	,000	,000		,000	,000	,123	,239	,000
N	211	211	211	211	211	211	211	211
İhale Tarihi (Ay)	-,271**	-,291**	,332**	1	-,499**	-,085	-,006	,159*
Anlamlılık (Pearson)	,000	,000	,000		,000	,220	,928	,021
N	211	211	211	211	211	211	211	211
İşin Süresi	,466**	,459**	-,560**	-,499**	1	,117	,035	-,341**
Anlamlılık (Pearson)	,000	,000	,000	,000		,091	,615	,000
N	211	211	211	211	211	211	211	211
Geçerli Teklif	,209**	,241**	-,107	-,085	,117	1	-,012	,014
Anlamlılık (Pearson)	,002	,000	,123	,220	,091		,862	,839
N	211	211	211	211	211	211	211	211
Onarımın Tipi	-,138*	-,122	-,081	-,006	,035	-,012	1	-,018
Anlamlılık (Pearson)	,046	,077	,239	,928	,615	,862		,796
N	211	211	211	211	211	211	211	211
Onarımın Yeri	-,099	-,082	,417**	,159*	,341**	,014	-,018	1
Anlamlılık (Pearson)	,151	,237	,000	,021	,000	,839	,796	
N	211	211	211	211	211	211	211	211

** Korelasyon 0.01 seviyesinde anlamlı (Çift taraflı).

* Korelasyon 0.05 seviyesinde anlamlı (Çift taraflı).

4. UYGULAMA VE BULGULAR (APPLICATION AND FINDINGS)

4.1. Lineer Regresyon Analizi (Linear Regression Analyses)

MSB tarafından BMP 2015 kapsamında gerçekleştirilen kamu binalarının muhtelif bakım onarım faaliyetlerine ait 211 verinin örneklem olarak alındığı regresyon analizinde ihale bedeli bağımlı değişken; yaklaşık maliyet, işin süresi, idare, ihale tarihi, onarım tipi ve geçerli teklif sayısı bağımsız değişken olarak alınmıştır.

Regresyon analizinin sonuçları Çizelge 5’de verilmiştir. Seçilen %5 anlamlılık seviyesinde, işin süresi ($P=0,198>0,05$), idare ($P=0,103>0,05$) ve onarım tipi

($P=0,096>0,05$) değişkenlerinin istatistiki açıdan anlamlı olmadığı anlaşılmaktadır. İhale tarihi ($P=0,040<0,05$) ve geçerli teklif sayısı ($P=0,024<0,05$) değişkenlerinin regresyona çok sınırlı katkısı bulunmaktadır. Buna karşın, yaklaşık maliyet ($P=0,0005<0,05$) değişkeninin regresyona önemli katkıda bulunduğu görülmektedir.

İhale bedelindeki değişimi tahmin etmek için yaklaşık maliyetin bağımsız değişken olarak alındığı yeni bir model oluşturulmuş ve regresyon analizi tekrarlanmıştır. Analiz sonuçları Çizelge-6’da verilmiştir. Sonuçlar beklendiği gibi ihale bedeli ile yaklaşık maliyet bağımsız değişkeni arasında güçlü bir korelasyona ($R=0,983$) işaret etmektedir.

Çizelge-5. Katsayılar^a

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standart Katsayılar	t	Anlamlılık
	B	Standart Hata	Beta		
1 (Sabit)	-16009,4	21705,664		-,738	,462
Yaklaşık Maliyet	,820	,012	,977	65,965	,000
İşin Süresi	150,979	116,943	,022	1,291	,198
İdare	-111,961	68,297	-,025	-1,639	,103
İhale Tarihi (Ay)	4072,096	1969,125	,030	2,068	,040
Geçerli Teklif	-2117,268	929,099	-,029	-2,279	,024
Onarım Tipi	-806,730	482,377	-,021	-1,672	,096

^a Bağımlı Değişken: İhale Bedeli

Çizelge-6. Katsayılar^a

Model	Standartlaştırılmamış Katsayılar		Standart Katsayılar	t	Anlamlılık
	B	Standart Hata	Beta		
1 (Sabit)	-5493,526	2928,225		1,876	,062
Yaklaşık Maliyet	,824	,011	,983	76,295	,000

^a Bağımlı Değişken: İhale Bedeli

Ŷ: İhale bedeli, a: Sabit değeri ve X₁: yaklaşık maliyeti göstermek üzere, gerçek doğrusal ilişkinin matematiksel modelini gösteren ifade (1) aşağıda denkleme dönüşmüştür.

$$\hat{Y} = a + bX_1 \quad (2)$$

Bağımsız değişkenlerin, bağımlı değişkende meydana gelen değişimleri açıklama gücü “Tanımlayıcılık (determinasyon) katsayısı” olarak adlandırılmakta ve R² ile ifade edilmektedir. Çizelge 7’deki R² (=0,965) değeri; yaklaşık maliyetin ihale bedelindeki değişimin %97’sini açıklayabildiğini göstermektedir. Çizelge 7’de 30,926.40 TL olarak hesaplanan “Standart Hata Tahmini” örneklerden elde edilen sonuçlar ile gerçek değerler arasındaki farkı yani başka bir ifadeyle fiili Y değerlerinin regresyon yüzeyi etrafındaki dağılımını göstermektedir[17].

Çizelge-7. Özet

Model	R	R ²	Düzeltilmiş R ²	Standart Hata Tahmini
1	,983 ^a	,965	,965	30,926.39901

^a Tahmin Unsurları: (Sabit), Yaklaşık Maliyet

Bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki korelasyon H₀ ve H₁ hipotezleri ile test edilmiştir.

H₀: Bağımlı değişken (ihale bedeli) ile bağımsız değişken (yaklaşık maliyet) arasında doğrusal bir ilişki yoktur.

$$[H_0: b_1=0]$$

H₁: Bağımlı değişken (ihale bedeli) ile bağımsız değişken (yaklaşık maliyet) arasında doğrusal bir ilişki vardır.

$$[H_1: b_1 \neq 0]$$

Çizelge 8’deki açıklanan (regresyon) değişiminin açıklanamayan (residual) değişime oranını gösteren (mean karelerin oranı) F (=5820,95) değeri istatistikî açıdan önemli (P=0,0005) bulunmuştur. H₀ hipotezi

Çizelge-8. Anova^b

Model	Kareler Toplamı	df	Mean Kare	F	Anlamlılık
1 Regresyon	5,6E+012	1	5,567E+011	5820,95	,000 ^a
Rezidal	1,9E+011	209	956442155,6		
Toplam	5,8E+012	210			

seçilen %5 anlamlılık düzeyinde reddedilmiş ve böylelikle H₁ hipotezi yani modeldeki bağımsız değişken ile ihale bedeli arasında doğrusal bir ilişki olduğu hipotezi kabul edilmiştir.

^a Tahmin Unsurları: (Sabit), Yaklaşık Maliyet

^b Bağımlı Değişken: İhale Bedeli

Çizelge 6 B sütununda bulunan kısmi regresyon katsayıları kullanılarak, ihale bedeli ile ilgili tahmin edilen denklem (2),

$$\hat{Y} = -5493,526 + 0,824X \quad (3)$$

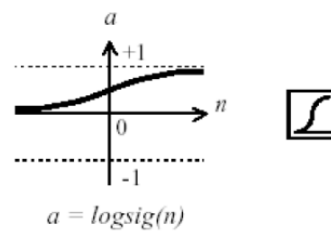
olarak elde edilmiştir.

4.2. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Network)

Regresyon Analizi ile ulaşılan sonuçları test etmek amacıyla aynı veri kümesi öncelikle;

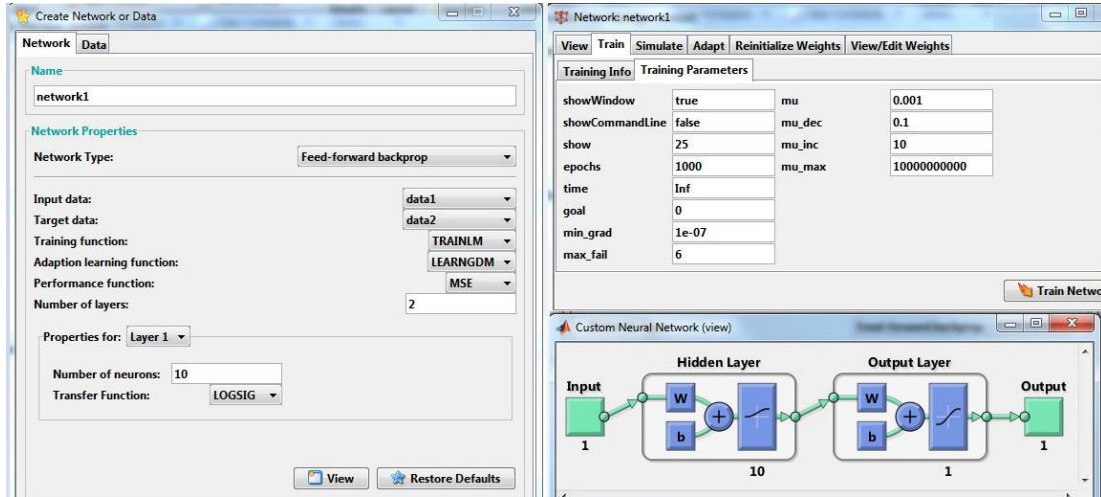
$$0.8 * [(X - \text{Min}) / (\text{Maks} - \text{Min})] + 0.1 \quad (4)$$

Formülüyle 0.0 ile 0.9 arasında normalize edilmiştir. Tüm sonuçların pozitif olduğundan transfer fonksiyonu olarak Log-Sigmoid Transfer Fonksiyonu (Şekil-3) kullanılmıştır. Biri gizli diğer çıktı katmanını olmak üzere iki katmanlı olarak oluşturulan ağız eğitim parametreleri, eğitim fonksiyonu ve gizli katman özelliklerine ait bilgiler Şekil-4’de özetlenmiştir.

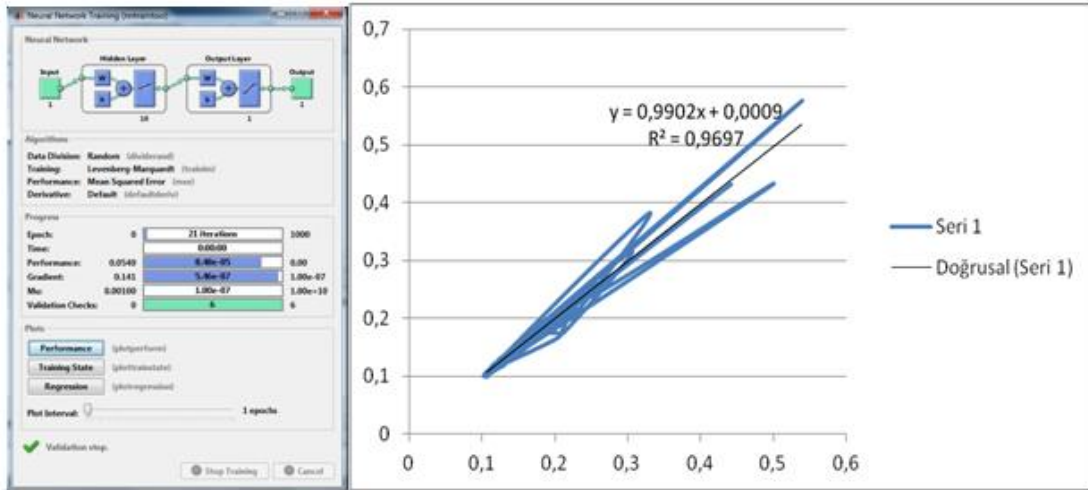


Şekil-3. Log-Sigmoid Transfer Fonksiyonu

Normalize edilen verilerden 5’in katlarına denk gelen satırlar test için (42 adet) ayrılmış ve geriye kalan 169 veri de YSA’larının eğitiminde kullanılmak üzere MatlabR2013b programında “nntool” modülüne girilmiştir



Şekil-4. Ağ Parametreleri

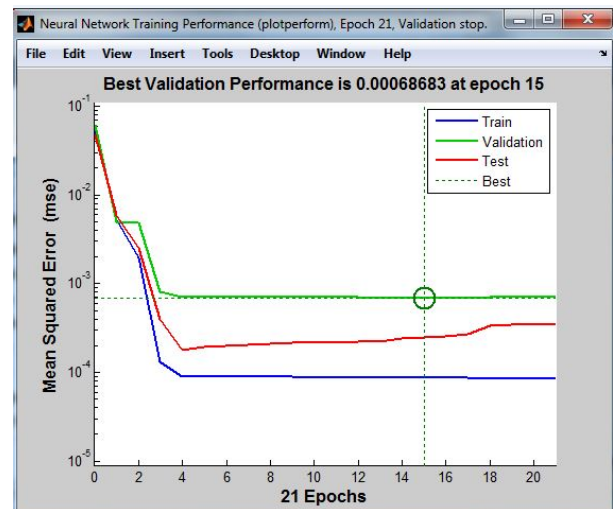


Şekil-5. YSA Eğitimi ve Sonuç-Tahmin Uyum Grafiği

Ağın eğitilmesini müteakip elde edilen sonuçlar Şekil-5’de, eğitim performans grafikleri Şekil-6’da verilmiştir. Ağın eğitimden sonra programın test verilerini kullanarak tahmin ettiği sonuçlar ile gerçek değerler excel ortamına aktarılır sonuçları karşılaştırmak üzere R² uyum grafiği çizilmiştir (Şekil-5).

Regresyon analizinden elde edilen denklem (3) ile YSA analizinden elde edilen sonuçların gerçek ihale bedeli ile karşılaştırılması amacıyla onarımı planlanan 2015/68784 İhale kayıt numaralı “Kazan Dairesi Onarımı” işine ait bilgiler aşağıda verilmiştir.

X ₁ :Yaklaşık Maliyet	: 200 092,24 TL
X ₂ :İşin Süresi (gün)	: 100 gün
X ₃ :İdare Md.lüğü	: 6 (Ankara Bölge)
X ₄ :İhale Tarihi (ay)	: 6 (22.06.2015)
X ₅ :Geçerli Teklif Sayısı	: 3
X ₆ :Onarım Tipi ve Kalorifer Tesisatı Onarımı)	: 5 (Kazan Değişimi)



Şekil-6. Performans Grafiği

Gerçek ihale bedelini tahmin etmek amacıyla her iki analizde de bağımsız değişken olarak sadece yaklaşık maliyet bedeli kullanılmıştır. Yaklaşık maliyet bedelinin denklem (3)’de yerine konması ve YSA analiz

sonucunun denklem (4)'e eşitlenerek bu ifadeden ihale bedelinin çekilmesi suretiyle her iki analizden de ayrı ayrı elde edilen ihale bedel tahminleri aşağıdaki çizelgede verilmiştir.

Formül	YSA
$\hat{Y} = -5493,526 + 0,824X$	$0,2=0,8(\hat{Y}-16\ 000) / (1\ 244\ 500 - 16\ 000) + 0,1$
$\hat{Y} = 159\ 382,48\ \text{TL}$	$\hat{Y} = 169\ 562,50\ \text{TL}$

Gerçekte $\hat{Y} = 178\ 000,00\ \text{TL}$ 'ye ihale edilen işin ihale bedeli regresyon analizi sonucu elde edilen ifade ile % 90 oranında ve YSA ile % 95 oranında tahmin edilebilmektedir.

5. SONUÇ VE ONERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

MSB tarafından BMP 2015 kapsamında gerçekleştirilen kamu binalarının muhtelif bakım onarım faaliyetlerine ait 211 verinin örneklem olarak alındığı regresyon analizinde, yaklaşık maliyet ile bağımlı değişken ihale bedeli arasında korelasyon katsayısı 0,824 olan ve bu değişimi % 97 oranında açıklama gücüne sahip, istatistiksel olarak anlamlı ve kuvvetli bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır. İhale bedeli ile yaklaşık maliyet arasındaki ilişkiye ait denklem, X: yaklaşık maliyet olmak üzere;

$$\hat{Y} = -5493,526 + 0,824X$$

şeklinde elde edilmiştir. YSA analizi de regresyonda olduğu gibi yaklaşık maliyetin bağımsız değişken olarak kullanılabilirliğini göstermiş, aynı veri kümesiyle gerçekleştirilen YSA analizi ile daha hassas bir yaklaşıklıkla ihale bedelinin tahmin edilebileceği görülmüştür. Öte yandan onarımı planlanan bir işin ihale bedelinin YSA'ya göre daha pratik olan regresyon analizi ile elde edilen denklem (3) ile yeterli hassasiyette tahmin edilebildiği görüldüğünden, bu aşamada YSA analizi sadece regresyon analizi sonuçlarını test etmek amacıyla ikinci bir yöntem olarak kullanılmıştır.

4734 sayılı Kamu İhale Kanununun, ödeneği olmayan işin ihale edilmemesi hükmünün, ödeneği yaklaşık maliyetin değil de ihale bedelinin altındaki işleri kapsamı gerektiğinden hareketle, çalışmada elde edilen ihale bedeli ile yaklaşık maliyet arasındaki ilişki;

$$X = (\hat{Y} + 5493,526) / 0,824$$

şeklinde düzenlenerek ihale öncesi ödeneğin ne kadar üstündeki yaklaşık maliyetli işler için ödenek endişesi duymadan ihale işlemlerine devam edilebileceği hesaplanabilecektir. Emniyetli tarafta kalmak için denklemdeki sabit taraf ihmal edildiğinde, yaklaşık maliyeti, tahsisli ödeneğin % 21'i üstündeki işlerin ihale bedellerinin % 95 güven aralığında bütçesi içinde ihale edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Diğer taraftan, onarım işlerinde ihale bedeli ile işin süresi, işi ihale eden idare ve onarım tipi arasında anlamlı bir ilişki tespit edilememiştir. İhale tarihi ve geçerli teklif

sayısı değişkenlerinin regresyona katkısının çok sınırlı olduğu, yaklaşık maliyetin ihale bedelini tek başına % 97 oranında açıklayabildiği görülmüştür (Çizelge-5).

Bu çalışmada geçerli teklif sayısındaki artışın ihale bedelinde belirgin bir azalmaya sebep olmadığı ve yılın ilerleyen zamanlarında yapılan ihalelerin ihale bedelini az da olsa arttırdığı görülmüştür. Buradan yetersiz katılım nedeniyle ihaleyi tekrarlamamanın fiyat avantajı sağlamadığı sonucuna ulaşmak mümkündür. İşin yapıldığı il ile ihale bedelinin arasında anlamlı bir ilişki olmamasının, onarım işlerinin genellikle mahalli yükleniciler tarafından üstlenilmesinden kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Benzer şekilde ihale bedeli ile idare arasında anlamlı bir ilişki kurulamamasının, onarım işlerinin genellikle sürekli tedarikçiler tarafından üstlenilmesi ve bu firmaların farklı idarelerle çalışmamasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

MSB.lığına ait verilerin değerlendirildiği bu çalışmada; farklı bakanlıkların onarım işlerine ait ülke genelini temsil edecek yeterli sayıda örnek ve güvenilir veri temin edilebilirse, yaklaşık maliyet verileriyle ihale bedeli hakkında güçlü bir tahmin yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Doğruluğu ispatlanan bu tip bir yöntemin, ihale bedelini önceden gerçekçi bir şekilde tahmin etmede kullanılabilir ve bu yolla yaklaşık maliyeti ödeneğini aşan ancak ihale sonrası ilave ödeneğe ihtiyacı kalmayacak onarım işlerinde olası kayıpların önüne geçilebilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] MY 319-1 (A) "Türk Silahlı Kuvvetleri İnşaat Emlak Yönergesi", (2005).
- [2] Ahmad I., and Minkarah I., "Questionnaire Survey on Bidding in Construction" *Journal of Management in Engineering*, 10.1061/(ASCE). 9742-597X(1988)4:3(229), 229–243, (1988).
- [3] Ahmad I., "Decision-Support System for Modelling The Bid/no bid Decision Problem", *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(4), 595–607, (1990).
- [4] Shash A.A., "Factors Considered in Tendering Decisions by Top UK Contractors", *Construction Management and Economics*, 11.2 (1993): 111-118, (1993).
- [5] Shash A. A., and Abdul-Hadi, N. H., "The Effect of Contractor Size on Mark-up Size Decision in Saudi Arabia", *Construction Management and Economics*, 11(3), 421–429, (1993).
- [6] Dikbaş H.A., "Türk İnşaat Firmalarının Teklif Verme Sürecinde Karar Vermelerini Etkileyen Faktörlerin Analizi", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul (1995).

- [7] Jarkas A. M., Saleh A. M., and Charles Y. K., "Critical Factors Determining Bid/No Bid Decisions of Contractors in Qatar" *Journal of Management in Engineering*, 30(4): 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000223, 05014007, (2014).
- [8] Oo B., Drew D., and Lo H. "Modeling the Heterogeneity in Contractors' Mark-Up Behavior." *Journal of Construction Engineering and Management*, 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000186, 720-729, (2010).
- [9] Clough R. H., and Sears G. A., "Construction Contracting", *John Wiley & Sons*, (1994).
- [10] Bagies A., and Fortune C., "Bid/no bid Decision Modelling for Construction Projects", *In Procs 22nd Annual ARCOM Conference*, Birmingham, UK, Association of Researchers in Construction Management (pp. 511-521), (2006).
- [11] Mubarak S. and Means R. S., "How to Estimate with RS Means Data: Basic Skills for Building Construction", 4th Ed., *Wiley, Hoboken*, NJ, (2012).
- [12] Hwang J. S., and Kim Y. S., "A Bid Decision-Making Model in the Initial Bidding Phase for Overseas Construction Projects", *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 1-12, (2015).
- [13] Efendigil T., Önüt S., and Kahraman C., "A Decision Support System for Demand Forecasting with Artificial Neural Networks and Neuro Fuzzy Models: A Comparative Analysis", *Expert Systems with Applications*, 36(3-2): 6697-6707, (2009).
- [14] İşeri A., and Karlık B., "An Artificial Neural Network Approach on Automobile Pricing", *Expert Systems with Applications*, 36(3-1): 2155-2160, (2009).
- [15] Smith K., and Jatinder N.D. Gupta, "Neural Networks in Business: Techniques and Applications for The Operations Researcher", *Computers & Operations Research*, 27(11-12): 1023-1044,(2000).
- [16] Akgül A., ve Çevik O., "İstatistiksel Analiz Teknikleri SPSS'te İşletme Yönetimi Uygulamaları", *Emek Ofset*, 975-96359-3-3, Ankara. (2003).
- [16] Köksal B.A., "İstatistik Analiz Metotları", *Çağlayan Kitapevi*, İstanbul (1985).

Dalgacık Dönüşümü ile Beton Basınç Dayanım Tahmininin İyileştirilmesi

Ersin NAMLI^{a*}, Halil İbrahim ERDAL^b, Hamit ERDAL^c

^a İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

^b Türk İşbirliği ve Koordinasyon Ajansı (TİKA), Ankara, Türkiye

^c Atatürk Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Erzurum, Türkiye

(Geliş / Received : 08.02.2016 ; Kabul / Accepted : 25.07.2016)

ÖZ

Betonun basınç dayanımının tahmini araştırmacılar tarafından son yıllarda artan bir hızla ele alınmaktadır. Bu konuda geleneksel istatistiksel tahmin yaklaşım ve yöntemlerinin terk edilerek gelişmiş tahmin yaklaşım ve metodolojileri kullanılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada farklı karışım oranları kullanılarak Beton basınç dayanımının tahmininde Yapay Sinir Ağları (YSA) yöntemi ile Dalgacık Dönüşümü Yapay Sinir Ağları (DDYSA) yöntemlerinin tahmin performansları karşılaştırılmış ve veri setini ayırarak tahmin için daha kararlı duruma getiren Dalgacık Dönüşümünün (DD) tahmin performanslarının iyileşmeye/kötüleşmesine etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda veri seti dört farklı şekilde eğitilmiş ve on altı farklı test çalışması gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen testler neticesinde DD'nin geleneksel YSA'ya oranla daha tatmin edici tahmin sonuçları verdiği görülmüştür. Sonuç olarak DD'nin araştırmacılar ve beton üreticileri tarafından beton basınç dayanım tahmininde etkin bir yöntem olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Beton Basınç Dayanımı, Yapay Sinir Ağları, Dalgacık Dönüşümü.

Improving Prediction Accuracy of Concrete Compressive Strength via Wavelet Transform

ABSTRACT

In recent years, Compressive strength prediction of concrete is being studied with an increasing speed by researchers. Instead of traditional statistical techniques, advanced prediction methods are being used in this area of study. In this study artificial neural network (ANN) and wavelet transform artificial neural network (WTANN) methods' prediction performances were compared on compressive strength of concrete with different mixture ratios and additionally effect of wavelet transform which decomposes dataset into subsets for a stationary situation for prediction was presented. Within this scope dataset trained in four different ways and sixteen different tests performed. The results of tests performed, WTANN achieves higher prediction performance in comparison with ANN. Hence, it's proved that WT could be used by researchers as an effective predictive tool for concrete compressive strength

Keywords: Concrete Compressive Strength, Artificial Neural Networks, Wavelet Transform

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton dayanım testleri için gerekli deneysel çalışmalar yüklü miktarda malzeme, ekipman, işgücü ve finansal kaynak gerektireceğinden, önceden elde edilen veriler ve tahmin başarısı test edilmiş makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak tüm bu kaynak israflarının önüne geçilebilir.

Literatürde beton basınç dayanımının tahmin edilmesinde en fazla YSA kullanıldığı gözlenmiştir [1,2,3,4]. Yeh [3] Yüksek Performanslı Beton (YPB) basınç dayanımı tahmini için geleneksel istatistiksel yöntemlerden regresyon analizi (regression analysis) ile YSA'ların tahmin başarısını karşılaştırdığı çalışmasında YSA'ların üstünlüğünü raporlamıştır. Benzer şekilde Atıcı [5]'da YSA'ların çoklu regresyon analizi (multiple

regression analysis)'ne üstünlüğünü ortaya koymuştur. Çoklu regresyon analizi ile bir YSA modeli olan özdüzenleyici haritalar (self organization feature map, SOFM)'ın karşılaştırdığı bir diğer çalışmada Nikoo vd. [6] tarafından yapılmıştır. Yazarlar SOFM'un üstünlüğünü raporlamıştır.

İlerleyen yıllarda yapılan beton dayanımı tahminlemesi çalışmalarında giderek geleneksel istatistiksel yöntemlerin terk edildiği ve farklı makine öğrenmesi yöntemlerinin tahmin performanslarının karşılaştırıldığı veya hibrit yeni modellerin ağırlık kazandığı tespit edilmiştir. Fazel-Zarandi vd. [7] YPB basınç dayanımı tahmini için bulanık sinir ağları (fuzzy neural networks) ve polinomial sinir ağları (polynomial neural networks)'nın birleşiminden oluşan bir bulanık polinomial sinir ağı modeli önermiştir. Yeh ve Lien [8]'de karar ağacı (decision tree; operation tree) ve genetik algoritmalar (genetic algorithm)'ın kullanıldığı bir hibrit genetik karar ağacı (genetic operation tree) modeli geliştirmiştir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: enamli@istanbul.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 471-480

Cheng vd. [9] bulanık mantık (fuzzy logic, FL), ağırlıklı destek vektör malineleri (wSVM) ve hızlı dağılık genetik algoritmalar (fast messy genetik algorithms, fmGA)'ın kullanıldığı bir hibrit evrimsel bulanık destek vektör makinası çıkarımsal modeli (evolutionary fuzzy support vector machine inference model for time series data, EFSIMT) önermiştir. Chou vd. [10] beş farklı makine öğrenmesi yöntemini (YSA, DVM, çoklu regresyon analizi ve 2 farklı birleşik öğrenme modeli (çok katlı regresyon ağaçları (multiple additive regression trees, MART) ve torbalama regresyon ağaçları (bagging regression trees, BRT)) karşılaştırmalı ve hibrit olarak kullandıkları çalışmalarında hibrit modellerinin tahmin başarısının üstünlüğünü vurgulamıştır. Cheng vd. [11] genetik ağırlıklı piramit karar ağacı (genetic weighted pyramid operation tree, GWPOT) modeli önermiş ve geliştirilen modelin başarısı YSA, DVM ile evrimsel destek vektör makinesi çıkarımsal modeli (evolutionary support vector machine inference model, ESIM) ile karşılaştırmıştır ve çalışmada önerilen modelin üstünlüğü rapor edilmiştir. Literatürde dalgacık dönüşümünün ses [12], dil [13] ve el hareketi tanıma [14], elektrik yükü [15] ve rüzgar gücü tahmini [16], hava kirliliğinin analizi [17], borsa tahmini [18], nehir debisi tahmini [19], hata analizi [20], pirinç hasadı zamanı [21], uyku apnesinin sınıflandırılması [22] gibi birçok disiplinde yaygın olarak kullanılmasına rağmen inşaat mühendisliği [23, 24] ve özellikle beton basınç dayanımı tahmininde [25] sınırlı çalışmada kullanıldığı tespit edilmiştir. Yukarıda sayılan çalışmaların tamamında dalgacık dönüşümünün tahmin başarılarını artırdığı ortaya koyulmuştur.

Bu çalışmada; insan beyninin biyolojik sinir sisteminin çalışma şeklinin simüle edilmesiyle bilgi işleme fonksiyonundan esinlenerek geliştirilen YSA'lar, beton basınç dayanımı tahminlemesinde kullanılmış ve DD'nin tahmin başarısına etkisi araştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde uygulanan yöntem ve prosedürler açıklanmış, üçüncü bölümde test çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular paylaşılarak önceki çalışmalarla karşılaştırılmış ve genel bir değerlendirmenin yapıldığı sonuç bölümüyle çalışma tamamlanmıştır.

2. YÖNTEM VE PROSEDÜRLER (METHODS AND PROCEDURES)

Bu bölümde öncelikle, çalışmada kullanılan yöntemler tanıtılacak daha sonra uygulanan prosedürler açıklanacaktır.

2.1. Yapay Sinir Ağları (Artificial Neural Networks)

YSA'lar insan beyninin biyolojik sinir sisteminin çalışma şekli ve bilgiyi işlem fonksiyonundan esinlenerek geliştirilmiştir. Basit bir sinir ağı modeli olan ilk YSA modeli 1943'de, W. McCulloch ve W. Pitts tarafından geliştirilmiştir[6]. 1948'de Wiener'in "Cybernetics" adlı eserini, 1949 yılında Hebb'in yapay sinir ağının ilinti sayısının değiştirilmesiyle öğrenme arasında ilişki kuran "Hebb Kuralı" izlemiştir. 1957'de F. Rosenblatt'ın tek

katmanlı, eğitilebilen ve tek çıkışlı bir ağ modeli olan Perceptron'u geliştirmesinden sonra, YSA çalışmaları hız kazanmıştır [26,27,28].

Dünyada bilinen pek çok şirket ve kuruluş, karşılaştıkları problemlerin çözümünde profesyonel YSA tabanlı programlardan yararlanmaktadır. Bu şirketlerden bazıları; Bank of America, Boeing, BP, Dell, NASA, Phillip Morris, Pfizer, Xerox ve Volvo'dur [28].

YSA'da girdi değerleri ile çıktı değerleri arasındaki fark denklem(1)'de ki hata fonksiyonu ile elde edilir [12,26,28] (d_j : hedeflenen sonuç, o_j : gerçekleşen sonuç)[29].

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_j (d_j^p - o_j^p)^2 \quad (1)$$

Ağırlıkları yeniden düzenlemek için hata fonksiyonunun farkı kullanılır.

$$\Delta^p w_{ji} = -n \left(\frac{\partial E^p}{\partial w_{ji}} \right) \quad (2)$$

Burada "öğrenme oranı" η parametresi herhangi bir değer seçilebilir. Ağırlıkların yeniden düzenlenmesi

$$w_{ij}(t+1) \cong w_{ij}(t) + n \delta_j i_i \quad (3)$$

şeklinde yapılır. Burada $w_{ij}(t)$: ağırlık, i_i : i düğümünün sonuç değeri olabileceği gibi bir giriş, δ_j : j düğümünün hata terimi de olabilir. Bir çıkış düğümü için hata terimi (δ_j);

$$\delta_j \cong o_j(1 - o_j)(d_j - o_j) \quad (4)$$

olarak elde edilir. j düğümü bir gizli düğüm ise hata terimi (δ_j);

$$\delta_j \cong o_j(1 - o_j) \sum_k \delta_k w_{jk} \quad (5)$$

olarak düzenlenir. Bir "moment" teriminin (α) eklenmesi ile ağırlık değişimleri üzerine etki yapılabilir.

$$w_{ij}(t+1) \cong w_{ij}(t) + n(d_j - o_j)i_i + \alpha(w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)) \quad (6)$$

2.2. Dalgacık Dönüşümü (Wavelet Transform)

Dalgacık dönüşümü bir zaman serisini farklı frekans seviyelerindeki farklı alt serilere ayrıştırır. Ayrıştırılan alt kümeler daha yerleşik bir davranış içerisinde oldukları için daha güçlü bir tahmin imkânı sağlarlar [25]. DD, "anne dalgacık" olarak adlandırılan özgün fonksiyonun $\psi(t)$ dönüştürülmesi ve genişletilmesiyle sinyalin aile fonksiyonlarına $\psi_{a,b}(t)$ ayrılmasıdır [30,31]. Grossman ve Morlet (1984), sismik sinyalleri, sonlu süreli ve titreşimli bir sinyalin farklı zaman bazındaki şekilleriyle birleştirerek sürekli dalgacık dönüşümünü (SDD) uygulama alanına geçirmişlerdir [32,33].

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} y \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (7)$$

Denklemden a ve b genişletme ve dönüştürme parametreleridir.

Ayrık dalgacık dönüşümü (ADD) ise bir sinyale temel matematiksel fonksiyonlar doğrultusunda ulaşmayı amaçlamaktadır [34] ve $\psi_{a,b}(t)$ dalgacığının ayrıştırılmasıyla SDD'den türetilir. En çok kullanılan ayrıştırma yöntemi denklemden görülen ikili (dyadic) ayrıştırma [35,36]:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} y \left(\frac{t-2^j k}{2^j} \right) \quad (8)$$

DD'nin Fourier dönüşümüne göre avantajlı dönüşümün frekans ve zaman bazlı ölçeklendirilebilir olmasıdır [37,38].

2.3. Prosedürler (Procedures)

Bu çalışmada Yeh [39] tarafından oluşturulan ve 17 farklı laboratuvarında yapılan 1030 örneklik beton dayanım testleri neticesinde elde edilen veri seti kullanılmıştır. Veri setinde 8 farklı değişken kullanılmıştır. Bu değişkenler ve değişkenlere ait temel istatistikleri gösteren Çizelge 1'de görüldüğü gibidir.

Çizelge 1. Beton bileşenleri (Concrete components).

Girdiler	Birim	Min.	Maks.	Ort.	Varyans
Çimento	kg/m ³	102.0	540.0	281.2	10921.5
Yüksek Fırın Cürufu	kg/m ³	11.0	359.4	107.3	3829.6
Uçucu Kül	kg/m ³	24.5	200.1	83.9	1599.1
Su	kg/m ³	121.8	247.0	181.6	593.1
Süperplastikleştirici	kg/m ³	1.7	32.2	8.5	16.3
Kaba Agregası	kg/m ³	801.0	1,145.0	972.9	6045.7
İnce Agregası	kg/m ³	594.0	992.6	773.6	6428.2
Numune Bekleme Süresi	gün	1.0	365.0	45.7	3990.5
Beton Basınç Dayanımı	MPa	2.3	82.6	35.8	279.1

Çalışmada yöntemlerin eğitim ve test aşamaları için ikisi k-kümelikli çapraz-geçerlilik, diğer ikisi de rassal ayırma yönteminin kullanıldığı 4 model oluşturulmuştur (Model-1: 10 kümelikli çapraz-geçerlilik, Model-2: 5 kümelikli çapraz-geçerlilik, Model-3: %90 rassal ayırma, Model-4: %80 rassal ayırma).

Açık kaynak kodlu WEKA 3.7.7. programıyla önce YSA ve DDYSA yöntemiyle en iyi sonucu ortaya çıkaracak parametrelerin bulunması amacıyla η ve α için 0.2, 0.3 ve 0.4; h için 5 ve 10 değerleri sırasıyla 500 ve 1000 iterasyon sayıları (T) ile denenecek şekilde bir test prosedürü geliştirilmiştir.

Çizelge 2, 3 ve 4'de bahsi geçen 4 model için iterasyon sayısı ve h değerlerinin sabit; η ve α değerlerinin sırasıyla 0.2, 0.3, 0.4 değerlerini almasına göre 9 deney sonucunu gösteren 16'şar adet test çalışması yapılmıştır.

Yapılan tahminlerin başarı kriteri olarak determinasyon katsayısı (coefficient of determination, R^2), ortalama mutlak hata (mean absolute error, MAE) ve ortalama hata karesinin kökü (root mean square error, RMSE) alınmıştır. Ele alınan problem için aşağıda sunulan denklemlerde ifade edilen o_i ve t_i sırasıyla yöntemin tahmin sonuçlarını ve gerçekleşen değerleri göstermektedir. N ise gözlem değerini ifade etmektedir [27].

Bağımlı değişkendeki toplam değişimin % kaçının bağımsız değişkenler tarafından açıklandığını bulmak için regresyon analizinde R^2 'den yararlanılır. R^2 değeri 0 ile 1 arasında bir değer alır. Değer 0'a yaklaşırsa modelin veriye uyum göstermediği veya bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkendeki değişmeyi açıklayamadığı, 1'e yaklaşırsa bağımlı değişkendeki değişimin bağımlı değişkenler tarafından iyi açıklandığını gösterir.

$$R^2 = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2}{\sum_{i=1}^N (o_i - \bar{o}_i)^2} \right)^2 \quad (9)$$

MAE, tahmin değerleri ile gerçekleşen tahmin değerleri arasındaki mutlak hatayı sorgular. MAE değeri ne kadar sıfıra yaklaşırsa, modelinin tahmin yeteneğinin o kadar iyi olduğu sonucu çıkar.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |o_i - t_i| \quad (10)$$

RMSE, tahmin değerleri ile gerçekleşen tahmin değerleri arasındaki hata oranını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. RMSE'nin sıfıra yaklaşması modelin tahmin performansının artması anlamına gelir.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (o_i - t_i)^2}{N}} \quad (11)$$

3. BULGULAR (FINDINGS)

Determinasyon katsayısı (R^2) performans ölçütü sonuçlarına göre 4 modelde de dalgacık dönüşümünün

sonuçlarda ciddi iyileşme sağladığı görülmektedir (Çizelge 2.).

Model-2 (5 kümeli çapraz-geçerlilik)'de en kötü R² değerlerinde 2.3% ile 10.2%; en iyi R² değerlerin de

Çizelge 2. YSA ve DDYSA yöntemleriyle elde edilen R² sonuçları (R² results obtained by ANN and WANN).

Modeller	Test Çalışmaları ($\eta=0.2, 0.3, 0.4;$ $\alpha=0.2, 0.3, 0.4$)	YSA			DDYSA			İyileşme (%)		
		Eİ	EK	ORT	Eİ	EK	ORT	Eİ	EK	ORT
Model-1 10 Kümeli Çapraz-geçerlilik	TÇ-1 (T= 500 h=10)	0.8301	0.6068	0.7462	0.8458	0.7781	0.8199	1.9%	28.2%	9.9%
	TÇ-2 (T=1000 h=10)	0.8281	0.6137	0.7294	0.8567	0.7375	0.8164	3.5%	20.2%	11.9%
	TÇ-3 (T=1000 h=5)	0.7980	0.6750	0.7416	0.8266	0.7482	0.7930	3.6%	10.8%	6.9%
	TÇ-4 (T=500 h=5)	0.7983	0.6677	0.7441	0.8228	0.7557	0.7857	3.1%	13.2%	5.6%
	TÇ-5 (T= 500 h=10)	0.8458	0.7560	0.8007	0.8662	0.8312	0.8484	2.4%	9.9%	6.0%
Model-2 5 Kümeli Çapraz-geçerlilik	TÇ-6 (T=1000 h=10)	0.8493	0.7453	0.7900	0.8768	0.8212	0.8505	3.2%	10.2%	7.7%
	TÇ-7 (T=1000 h=5)	0.8451	0.7300	0.7888	0.8591	0.7465	0.8175	1.7%	2.3%	3.6%
	TÇ-8 (T=500 h=5)	0.8407	0.7683	0.7997	0.8521	0.7914	0.8269	1.4%	3.0%	3.4%
	TÇ-9 (T= 500 h=10)	0.9143	0.8429	0.8834	0.9378	0.9164	0.9264	2.6%	8.7%	4.9%
Model-3 %90 Rassel ayırma	TÇ-10 (T=1000 h=10)	0.9149	0.8553	0.8893	0.9442	0.8955	0.9300	3.2%	4.7%	4.6%
	TÇ-11 (T=1000 h=5)	0.9099	0.8378	0.8709	0.9120	0.9025	0.9070	0.2%	7.7%	4.1%
	TÇ-12 (T=500 h=5)	0.9078	0.8367	0.8669	0.9124	0.9012	0.9066	0.5%	7.7%	4.6%
	TÇ-13 (T= 500 h=10)	0.8938	0.6670	0.7960	0.9120	0.8940	0.9045	2.0%	34.0%	13.6%
Model-4 %80 Rassel ayırma	TÇ-14 (T=1000 h=10)	0.8921	0.6665	0.7878	0.9260	0.8879	0.9100	3.8%	33.2%	15.5%
	TÇ-15 (T=1000 h=5)	0.8921	0.7344	0.8472	0.9046	0.8860	0.8940	1.4%	20.6%	5.5%
	TÇ-16 (T=500 h=5)	0.8898	0.7422	0.8435	0.9012	0.8851	0.8938	1.3%	19.3%	6.0%

Model-1 (10 kümeli çapraz-geçerlilik) için test çalışması (TÇ) 1, 2, 3 ve 4 incelendiğinde YSA ve DDYSA yöntemleri için en iyi R² değerleri karşılaştırıldığında 1.9% ile 3.6% arasında iyileşme sağlandığı gözlenmiştir. En kötü R² değerleri karşılaştırıldığı zaman iyileşme oranlarının çok daha çarpıcı olarak 10.8% ile 28.2% arasında olduğu görülmüştür.

1.7% ile 3.2% ve ortalama sonuçlarda 3.4% ile 7.7% arasında iyileşme sağlandığı görülmüştür.

Model-3 (%90 rassel ayırma)'de en kötü, en iyi ve ortalama değerlerindeki iyileşmeler sırasıyla 4.7% ile 8.7%; 0.2% ile 3.2% ve 4.1% ile 4.9% arasında sağlanmıştır.

Çizelge 3. Modellere göre YSA ve DDYSA yöntemleriyle elde edilen R² sonuçları (R² results obtained by ANN and WANN according to the models).

	YSA			DDYSA			Improvement (%)		
	Eİ	EK	ORT	Eİ	EK	ORT	Eİ	EK	ORT
Model-1	0.8301	0.6068	0.7403	0.8567	0.7375	0.8038	3.2%	21.5%	8.6%
Model-2	0.8493	0.7300	0.7948	0.8768	0.7465	0.8358	3.2%	2.3%	5.2%
Model-3	0.9149	0.8367	0.8776	0.9442	0.8955	0.9175	3.2%	7.0%	4.5%
Model-4	0.8938	0.6665	0.8186	0.9260	0.8851	0.9006	3.6%	32.8%	10.0%

Son model olan Model-4 (%80 rassal ayırma)'de en kötü R² değerlerindeki iyileşmelerin son derece dikkate değer olarak 19.3% ile 34.0% arasında olduğu hesaplanmıştır. En iyi R² değerleri ve ortalama değerlerde, sırasıyla 1.3% ile 3.8% ve 5.5% ile 15.5% arasında iyileşmeler elde edilmiştir.

iyi (MAE: 4.97) ve en kötü (MAE: 7.25) sonuçlar sırasıyla TÇ-2 ve TÇ-4'de elde edilmiştir. Model-1 için YSA ve DDYSA ile elde edilen en iyi, en kötü ve ortalama sonuçlarda sırasıyla 11.5%, 28.0% ve 19.8% iyileşme sağlanmıştır (Çizelge 5.).

Model-2'de en iyi, en kötü ve ortalama değerlerdeki

Çizelge 4. YSA ve DDYSA yöntemleriyle elde edilen MAE sonuçları (MAE results obtained by ANN and WANN).

Modeller	Test Çalışmaları ($\eta=0.2, 0.3, 0.4;$ $\alpha=0.2, 0.3, 0.4$)	YSA			DDYSA			İyileşme (%)		
		EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT
Model-1 10 Kümeli Çapraz-geçerlilik	TÇ-1 (T= 500 h=10)	9.37	5.54	6.98	6.45	5.18	5.76	45.2%	6.9%	21.2%
	TÇ-2 (T=1000 h=10)	9.37	5.55	7.24	6.39	4.97	5.72	46.6%	11.6%	26.5%
	TÇ-3 (T=1000 h=5)	8.44	6.04	7.28	7.32	5.42	6.26	15.3%	11.5%	16.3%
	TÇ-4 (T=500 h=5)	8.80	6.01	7.31	7.25	5.51	6.32	21.4%	9.0%	15.7%
	TÇ-5 (T= 500 h=10)	6.53	4.98	5.83	5.41	4.66	5.00	20.8%	7.0%	16.7%
Model-2 5 Kümeli Çapraz-geçerlilik	TÇ-6 (T=1000 h=10)	6.39	4.90	5.70	5.44	4.37	4.92	17.6%	12.2%	16.0%
	TÇ-7 (T=1000 h=5)	6.29	5.06	5.82	5.93	4.85	5.24	6.1%	4.4%	11.0%
	TÇ-8 (T=500 h=5)	6.27	5.22	5.85	5.82	4.89	5.26	7.6%	6.7%	11.3%
	TÇ-9 (T= 500 h=10)	8.59	4.12	5.76	4.68	4.08	4.32	83.4%	1.0%	33.3%
Model-3 %90 Rassal ayırma	TÇ-10 (T=1000 h=10)	8.22	4.07	5.62	4.49	3.87	4.16	83.3%	5.1%	35.0%
	TÇ-11 (T=1000 h=5)	6.90	5.26	5.96	4.93	4.40	4.66	39.9%	19.4%	28.0%
	TÇ-12 (T=500 h=5)	6.97	5.43	6.14	5.08	4.39	4.68	37.2%	23.7%	31.2%
	TÇ-13 (T= 500 h=10)	9.42	4.58	6.72	4.29	3.86	4.15	119.5%	18.6%	62.0%
Model-4 %80 Rassal ayırma	TÇ-14 (T=1000 h=10)	9.48	4.65	6.77	4.29	3.71	4.09	120.7%	25.5%	65.3%
	TÇ-15 (T=1000 h=5)	7.44	4.42	5.43	5.38	4.25	4.80	38.3%	3.9%	13.1%
	TÇ-16 (T=500 h=5)	7.42	4.46	5.49	5.57	4.34	4.88	33.2%	2.6%	12.4%

MAE performans ölçütü sonuçlarına göre 4 model için 16 test çalışmasından elde edilen iyileşme oranları Çizelge 4.'de sunulmuştur.

Buna göre Model-1'de en iyi sonuçlarda 6.9% ile 11.6%, en kötü sonuçlarda 15.3% ile 46.6% ve ortalama sonuçlarda 15.7% ile 26.5% arasında iyileşme olduğu saptanmıştır. Model-1'de YSA ile en iyi (MAE: 5.54) ve en kötü (MAE: 9.37) sonuçlar TÇ-1'de, DDYSA ile en

iyileşmeler ise sırasıyla 4.4% ile 12.2%; 6.1% ile 20.8% ve 11.0% ile 16.7% şeklinde gerçekleşmiştir. Model-2'de YSA (4.90) ve DDYSA (4.37) ile en iyi sonuçlar TÇ-6'da elde edilmiştir. YSA ile en kötü sonuç TÇ-5 (6.53)'de, DDYSA ile en kötü sonuç TÇ-7 (5.93)'de sağlanmıştır. Buna göre YSA ve DDYSA ile elde edilen en kötü, en iyi ve ortalama sonuçlarda sırasıyla 10.1%, 12.2% ve 13.7% iyileşme sağlanmıştır (Çizelge 5.).

Çizelge 5. Modellere göre YSA ve DDYSA yöntemleriyle elde edilen MAE sonuçları (MAE results obtained by ANN and WANN according to the models).

	YSA			DDYSA			Improvement (%)		
	EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT
Model-1	9.37	5.54	7.20	7.32	4.97	6.02	28.0%	11.5%	19.8%
Model-2	6.53	4.90	5.80	5.93	4.37	5.10	10.1%	12.2%	13.7%
Model-3	8.59	4.07	5.87	5.08	3.87	4.46	69.1%	5.1%	31.8%
Model-4	9.48	4.42	6.10	5.57	3.71	4.48	70.1%	19.1%	36.2%

3. ve 4. Modeller için en iyi MAE değerlerindeki iyileşmeler sırasıyla 1.0% ile 23.7% ve 2.6% ile 25.5%; en kötü MAE değerlerindeki iyileşmeler sırasıyla 37.2% ile 83.4% ve 33.2% ile 120.7% son olarak ortalama MAE değerlerindeki iyileşmeler sırasıyla 28.0% ile 35.0% ve 12.4% ile 65.3% arasında gerçekleşmiştir. Model-3'de YSA (MAE: 4.07) ve DDYSA (MAE: 3.87) ile en iyi sonuçlar TÇ-10'da, YSA ile en kötü sonuç (MAE: 8.59)TÇ-9'da ve DDYSA ile en kötü sonuç (MAE: 5.08) TÇ-12'de elde edilmiştir.

Model-4 için ise YSA ve DDYSA ile en iyi sonuçlar (YSA-MAE: 4.42, DDYSA-MAE: 3.71) sırasıyla TÇ-15 ve TÇ-14'de, en kötü sonuçlar (YSA-MAE:9.48, DDYSA-MAE: 5.57) yine sırasıyla TÇ-14 ve TÇ-16'da elde edilmiştir.

4 Model için 16 test çalışmasından elde edilen RMSE performans ölçütü sonuçları Çizelge 6.'da sunulmuştur.

Çizelge 6. YSA ve DDYSA yöntemleriyle elde edilen RMSE sonuçları (RMSE results obtained by ANN and WANN).

Modeller	Test Çalışmaları ($\eta=0.2, 0.3, 0.4$; $\alpha=0.2, 0.3, 0.4$)	YSA			DDYSA			İyileşme (%)		
		EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT
Model-1 10 Kümeli Çapraz-geçerlilik	TÇ-1 (T= 500 h=10)	11.92	7.13	8.92	8.48	6.82	7.56	40.6%	4.4%	18.0%
	TÇ-2 (T=1000 h=10)	11.97	7.17	9.35	9.27	6.62	7.64	29.1%	8.2%	22.4%
	TÇ-3 (T=1000 h=5)	11.06	7.85	9.39	9.32	7.24	8.16	18.7%	8.5%	15.1%
	TÇ-4 (T=500 h=5)	11.45	7.79	9.38	9.25	7.27	8.30	23.7%	7.2%	13.0%
	TÇ-5 (T= 500 h=10)	8.57	6.61	7.68	6.99	6.17	6.58	22.5%	7.3%	16.7%
Model-2 5 Kümeli Çapraz-geçerlilik	TÇ-6 (T=1000 h=10)	8.62	6.60	7.80	7.23	5.92	6.54	19.1%	11.4%	19.2%
	TÇ-7 (T=1000 h=5)	8.83	6.67	7.78	8.88	6.39	7.28	-0.5%	4.4%	6.9%
	TÇ-8 (T=500 h=5)	8.11	6.81	7.60	7.84	6.52	7.08	3.4%	4.4%	7.4%
	TÇ-9 (T= 500 h=10)	10.36	5.27	7.18	5.90	4.94	5.33	75.5%	6.7%	34.6%
Model-3 %90 Rassal ayırma	TÇ-10 (T=1000 h=10)	10.00	5.22	7.01	5.96	4.70	5.22	67.7%	11.0%	34.4%
	TÇ-11 (T=1000 h=5)	8.39	6.33	7.31	5.98	5.49	5.75	40.5%	15.4%	27.3%
	TÇ-12 (T=500 h=5)	8.61	6.64	7.52	6.09	5.46	5.77	41.4%	21.6%	30.3%
	TÇ-13 (T= 500 h=10)	11.47	5.98	8.31	5.71	5.25	5.45	100.8%	14.0%	52.4%
Model-4 %80 Rassal ayırma	TÇ-14 (T=1000 h=10)	11.58	6.07	8.53	5.87	4.85	5.34	97.3%	25.3%	59.8%
	TÇ-15 (T=1000 h=5)	11.55	5.71	7.30	6.96	5.48	6.20	65.9%	4.3%	17.8%
	TÇ-16 (T=500 h=5)	11.22	5.82	7.37	7.10	5.67	6.25	57.9%	2.6%	17.9%

1, 2, 3 ve 4. Modeller için RMSE performans ölçütüne göre en iyi iyileşme oranları sırasıyla 4.4% ile 8.5%; 4.4% ile 11.4%; 6.7% ile 21.6% ve 4.3% ile 25.3% aralıklarında gerçekleşmiştir. En kötü RMSE değerleri için iyileşme oranları aralığı 1, 2, 3 ve 4. modeller için sırasıyla 18.7% ile 40.6%; -0.5% ile 22.5%; 40.5% ile 75.5% ve 57.9% ile 100.8% aralıklarında gerçekleşmiştir. Burada Model-2'de, TÇ-15 için 0.5%'lik bir kötüleşme olduğu görülmüştür. Bu değer tüm çalışma boyunca elde edilen tek olumsuz değerdir.

Model-1'de YSA ile en iyi (RMSE: 7.13) ve en kötü (RMSE: 11.97) sonuçlar sırasıyla TÇ-1 ve 2'den, DDYSA ile en iyi (RMSE: 6.62) ve en kötü (RMSE: 9.32) sonuçlar ise sırasıyla TÇ-2 ve 3'den elde edilmiştir (Çizelge 3.). Bu sonuçlar ışığında Model-1'de DDYSA ile en iyi, en kötü ve ortalama sonuçlarda sırasıyla 7.6%, 28.5% ve 17.0% iyileşmeler sağlanmıştır (Çizelge 6.).

Model-2'de YSA ve DDYSA ile hem en iyi, hem de en kötü sonuçlar TÇ-6 (YSA-RMSE: 6.60, 8.83; DDYSA-RMSE: 5.92, 8.88)'den elde edilmiştir (Çizelge 3.). Böylece en iyi, en kötü ve ortalama sonuçlarda ki değişim sırasıyla 11.4%, -0.5% ve 12.3% olarak gerçekleşmiştir (Çizelge 6.).

Model-3'de YSA ve DDYSA ile en iyi sonuçlar TÇ-10 (YSA-RMSE:5.22, DDYSA-RMSE: 4.70)'dan, YSA ile en kötü sonuç (RMSE: 10.36) TÇ-9'dan ve DDYSA ile

iyi sonuç (RMSE: 4.85) TÇ-14'den, YSA ile en kötü sonuç (RMSE: 11.58) TÇ-14'den elde edilirken, DDYSA ile en kötü sonuç (RMSE: 7.10) TÇ-16'dan elde edilmiştir. Dolayısıyla en iyi, en kötü ve ortalama değerlerdeki iyileşmeler sırasıyla 17.8%, 63.0% ve 35.6% olarak gerçekleşmiştir (Çizelge 7.).

4 model 16 ampirik çalışma sonucunda 3 performans ölçütüne göre DDYSA ile YSA'dan daha iyi tahmin performansı elde edilmiştir. YSA ve DDYSA ile R² performans ölçütüne göre en iyi sonuçlar Model-3 (YSA: 0.9149, DDYSA: 0.9442)'den, en kötü sonuçlar ise Model-1 (YSA: 0.6068, DDYSA: 0.7375)'den elde edilmiştir (Çizelge 4.). R² performans ölçütüne göre DDYSA ile en iyi, en kötü ve ortalama sonuçlarda sırasıyla 3.2%, 21.5% ve 8.6% iyileşme sağlandığı görülmüştür (Çizelge 7.).

MAE performans ölçütüne göre YSA ile en iyi (MAE: 4.07) ve en kötü (MAE: 9.48) sonuçlar sırası ile Model-3 ve Model-4'den elde edilirken, DDYSA ile en iyi (MAE: 3.87) ve en kötü (MAE: 7.32) sonuçlar sırası ile Model-3 ve Model-1'den elde edilmiştir (Çizelge 5.).

RMSE performans ölçütüne göre YSA ve DDYSA ile en iyi (YSA:5.22, DDYSA:4.70) sonuçlar Model-3'den, en kötü (YSA:11.97, DDYSA: 9.32) sonuçlar ise Model-1'den elde edilmiştir (Çizelge 6.).

MAE ve RMSE sonuçlarına göre en iyi, en kötü ve

Çizelge 7. Modellere göre YSA ve DDYSA yöntemleriyle elde edilen RMSE sonuçları (RMSE results obtained by ANN and WANN according to the models).

	YSA			DDYSA			Improvement (%)		
	EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT
Model-1	11.97	7.13	9.26	9.32	6.62	7.91	28.5%	7.6%	17.0%
Model-2	8.83	6.60	7.72	8.88	5.92	6.87	-0.5%	11.4%	12.3%
Model-3	10.36	5.22	7.25	6.09	4.70	5.52	70.1%	11.0%	31.5%
Model-4	11.58	5.71	7.88	7.10	4.85	5.81	63.0%	17.8%	35.6%

Çizelge 8: Performans ölçütlerine göre çözüm sonuçları (Solution results according to performance criteria).

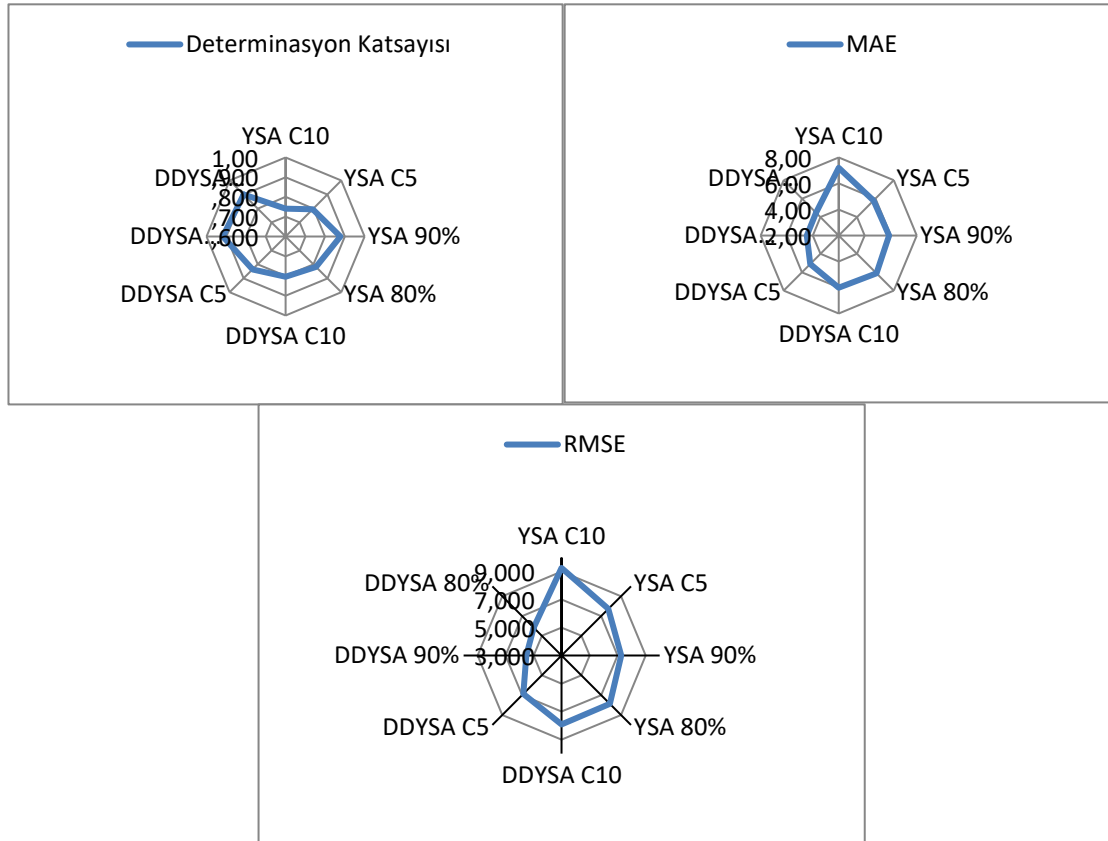
	YSA			DDYSA			Improvement (%)		
	EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT	EK	Eİ	ORT
R ²	0.6068	0.9149	0.8078	0.7375	0.9442	0.8644	21.5%	3.2%	8.6%
MAE	9.48	4.07	6.24	7.32	3.87	5.01	29.5%	9.6%	24.5%
RMSE	11.97	5.22	8.03	9.32	4.70	6.53	28.5%	11.0%	23.0%

en kötü sonuç (RMSE: 6.09) TÇ-12'den elde edilmiştir. Sonuç olarak bu modelde ki en iyi, en kötü ve ortalama değerlerdeki iyileşmeler sırasıyla 11.0%, 70.1% ve 31.5% olarak gerçekleşmiştir (Çizelge 6.).

Son model olan Model-4'de YSA ile en iyi sonuç (RMSE: 5.71)TÇ-15'den elde edilirken, DDYSA ile en

ortalama değerlerdeki iyileşmelerin sırası ile 9.6%, 29.5%, 24.5% ve 11.0%, 28.5%, 23.0% olduğu hesaplanmıştır (Çizelge 8.).

İstatistiksel performans ölçütüne göre elde edilen ortalama değerlerin grafik gösterimleri karşılaştırmalı olarak Şekil 1.'de sunulmuştur.



Şekil 1. İstatistiksel performans ölçütüne göre elde edilen ortalama değerlerin grafik gösterimleri (Graphical representation of average values obtained by statistical performance criteria).

Elde edilen sonuçlar aynı veri setinin farklı büyüklüklerinin kullanıldığı daha önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, YSA ile benzer sonuçlar elde edilmiş fakat DDYSA yöntemiyle önceki çalışmalardan daha yüksek tahmin başarısı elde edilmiştir. Literatürde, aynı veri seti kullanılarak yapılan çalışmaların bulguları Çizelge 9.'da sunulmuştur.

DDYSA'ların tahmin performansının YSA'dan daha iyi olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak; dalgacık dönüşümünün genelde çok boyutlu doğrusal olmayan tahmin problemlerinde, özde ise YPB'nin basınç dayanımının tahmin edilmesinde etkin bir yaklaşım olduğu ve yöntemin araştırma laboratuvarları ve beton üreticileri tarafından kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

Çizelge 9. Önceki Çalışmaların Bulguları (Findings of the previous studies).

Önceki Çalışmalar	Yöntemler	Veri seti büyüklüğü	(R ²)
Yeh [3]	YSA	727	0.8354
Chou vd. [10]	YSA	1030	0.8263
Erdal vd. [36]	YSA	1030	0.9088
	DDYSA		0.9397
Erdal [28]	YSA	1030	0.7379

4. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada YPB'nin basınç dayanımının tahmin edilmesi için YSA ve DDYSA yöntemleriyle karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 17 farklı laboratuvarda yapılan 1030 örneklik beton dayanım değerleri ile 8 farklı değişken ve verinin eğitim ile test verisi olarak ayrılması için 4 farklı model kullanılmıştır. Her iki yöntemle yapılan tahminler sonucunda; tutarlılık ve tahmin gücü açısından

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Hong-Guang, N., and Ji-Zong, W., Prediction of Compressive Strength of Concrete by Neural Networks, *Cement and Concrete Research*. 30: 1245-1250, (2000).
- Seyhan, A. T., Tayfur, G., Karakurt, M., Tanoğlu, M., Artificial Neural Network (YSA) Prediction of Compressive Strength of VARTM Processed Polymer Composites, *Computational Materials Science*. 34: 99-105, (2005).

3. Yeh, I. C., Modeling of Strength of High-Performance Concrete Using Artificial Neural Networks, *Cement and Concrete Research*, 28: 1797-1808, (1998).
4. Topcu, I. B., and Saridemir, M., Prediction of Compressive Strength of Concrete Containing Fly Ash Using Artificial Neural Networks and Fuzzy Logic, *Computational Materials Science*, 41: 305–311, (2008).
5. Atıcı, U., Prediction of the Strength of Mineral Admixture Concrete Using Multivariable Regression Analysis and An Artificial Neural Network. *Expert Systems with Applications*. 38: 9609–9618, (2011).
6. Nikoo, M., Zarfam, P., and Sayahpour, H., Determination of Compressive Strength of Concrete Using Self Organization Feature Map (SOFM), *Engineering with Computers*, 1-9, (2013).
7. Fazel-Zarandi, M. H., Türksen, I. B., Sobhani, J., and Ramezani-pour, A. A., Fuzzy polynomial Neural Networks for Approximation of the Compressive Strength of Concrete, *Appl. Soft Comput.*, 8(1): 488-498, (2008).
8. Yeh, I.C., and Lien, L-C., Knowledge Discovery of Concrete Material Using Genetic Operation Trees, *Expert Systems with Applications*, 36: 5807–5812, (2009).
9. Cheng, M-Y., Peng, H-S., Wu, Y-W., and Chen, T-L., Estimate at Completion for Construction Projects Using Evolutionary Support Vector Machine Inference Model, *Automation in Construction*. 19: 619–629, (2010).
10. Chou, J. S., Chiu, C. K., Farfoura, M., and Al-Taharwa, I., Optimizing the Prediction Accuracy of Concrete Compressive Strength Based on A Comparison of Data-mining Techniques, *Journal of Computing In Civil Engineering*, 25: 242-253, (2011).
11. Cheng, M-Y., Firdausi, P. M., and Prayogo, D., High-performance Concrete Compressive Strength Prediction using Genetic Weighted Pyramid Operation Tree (GW POT), *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 29: 104–113, (2014).
12. Xing, Y. F., Wang, Y. S., Shi, L., Guo, H., & Chen, H., Sound quality recognition using optimal wavelet-packet transform and artificial neural network methods, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 66: 875-892, (2016).
13. Karami, A., Zanj, B., & Sarkaleh, A. K., Persian sign language (PSL) recognition using wavelet transform and neural networks, *Expert Systems with Applications*, 38(3): 2661-2667, (2011).
14. Manea, S.M., Kambilib, R.A., Kazic, F.S., & Singhc, N.M., Hand Motion Recognition From Single Channel Surface EMG Using Wavelet & Artificial Neural Network, *Procedia Computer Science*, 49: 58-65, (2015).
15. Chaturvedi, D. K., Sinha, A. P., & Malik, O. P., Short term load forecast using fuzzy logic and wavelet transform integrated generalized neural network, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 67: 230-237, (2015).
16. Catalão, J. P. S., Pousinho, H. M. I., & Mendes, V. M. F., Short-term wind power forecasting in Portugal by neural networks and wavelet transform, *Renewable Energy*, 36(4): 1245-1251, (2011).
17. Feng, X., Li, Q., Zhu, Y., Hou, J., Jin, L., & Wang, J., Artificial neural networks forecasting of PM 2.5 pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation, *Atmospheric Environment*, 107: 118-128, (2015).
18. Hsieh, T. J., Hsiao, H. F., & Yeh, W. C., Forecasting stock markets using wavelet transforms and recurrent neural networks: An integrated system based on artificial bee colony algorithm, *Applied soft computing*, 11(2): 2510-2525, (2011).
19. Kalteh, A. M., Monthly river flow forecasting using artificial neural network and support vector regression models coupled with wavelet transform, *Computers & Geosciences*, 54: 1-8, (2013).
20. Jamil, M., Kalam, A., Ansari, A. Q., & Rizwan, M., Generalized neural network and wavelet transform based approach for fault location estimation of a transmission line, *Applied Soft Computing*, 19: 322-332, (2014).
21. Chen, C. F., Chen, C. R., Son, N. T., & Chang, L. Y., Delineating rice cropping activities from MODIS data using wavelet transform and artificial neural networks in the Lower Mekong countries, *Agriculture, ecosystems & environment*, 162: 127-137, (2012).
22. Tagluk, M. E., Akin, M., & Sezgin, N., Classification of sleep apnea by using wavelet transform and artificial neural networks, *Expert Systems with Applications*, 37(2): 1600-1607, (2010).
23. Wang, N., & Adeli, H., Self-constructing wavelet neural network algorithm for nonlinear control of large structures, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 41: 249-258, (2015).
24. Liu, S., Du, C., Mou, J., Martua, L., Zhang, J., & Lewis, F. L., Diagnosis of structural cracks using wavelet transform and neural networks, *NDT & E International*, 54: 9-18, (2013).
25. Tascikaraoglu A, Sanandaji BM, Poola K, Varaiya P. Exploiting sparsity of interconnections in spatio-temporal wind speed forecasting using Wavelet Transform, *Applied Energy*, 165(1): 735-747, (2016).
26. Aydoğmuş, H.Y., Ekinçi, A., Erdal, H.İ. & Erdal, H., Optimizing the monthly crude oil price forecasting accuracy via bagging ensemble models, *Journal of Economics and International Finance*, 7(5): 127-136, (2015).
27. Aydogmus, H.Y., Erdal, H.İ., Karakurt, O., Namli, E., Turkan, Y.S. & Erdal, H. A comparative assessment of bagging ensemble models for modeling concrete slump flow, *Computers and Concrete*, 16(5): 741-757, (2015).
28. Erdal, H., Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin İnşaat Sektörüne Katkısı: Basınç Dayanımı Tahminlemesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(3), 109-114, (2015).
29. Öztemel, E., Yapay Sinir Ağları, İstanbul, *Papatya Yayınılık*, (2003).
30. Haşiloğlu, A. S., & Bayramoğlu, M., A New Windowing Technique in Texture Classification, *Anadolu Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, (2001).
31. Meyer Y. Wavelets-algorithms and applications, *Wavelets- Algorithms and applications Society for Industrial and Applied Mathematics Translation.*, 142 p., (1993).
32. Gholizadeh, S., & Samavati, O. A., Structural optimization by wavelet transforms and neural networks. *Applied Mathematical Modelling*, 35(2): 915-929, (2011).
33. Grossmann A, Morlet J. Decomposition of Hardy functions into square integrable wavelets of constant shape, *SIAM journal on mathematical analysis*, 15(4): 723-36, (1984).
34. Kilic N, Gorgel P, Ucan ON, Sertbas A. Mammographic mass detection using wavelets as input to neural networks, *Journal of medical systems*, 34(6): 1083-1088, (2010),
35. Saravanan N, Ramachandran KI. Incipient gear box fault diagnosis using discrete wavelet transform (DWT) for feature extraction and classification using artificial neural

- network (ANN). *Expert Systems with Applications*, 30; 37(6): 4168-81, (2010).
36. Erdal HI, Karakurt O, Namli E. High performance concrete compressive strength forecasting using ensemble models based on discrete wavelet transform. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 30; 26(4): 1246-54, (2013).
37. Küçük M, Ağırlioğlu N. Dalgacık dönüşüm tekniği kullanılarak hidrolojik akım serilerinin modellenmesi, *İtüdergisi/d.*, 29; 5(2): (2011).
38. Chalus P, Walter S, Ulmschneider M., Combined wavelet transform-artificial neural network use in tablet active content determination by near-infrared spectroscopy. *Analytica chimica acta.*, 22; 591(2): 219-24, (2007).
39. Yeh, I. C., UCI Machine Learning Repository, *University of california*, [http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Concrete + Compressive+Strength](http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Concrete+Compressive+Strength), (2014).

Tokat Bölgesi Rüzgar Karakteristiğinin İstatistiksel Yöntemler ile İncelenmesi

Cem EMEKSİZ¹, Zafer DOĞAN², Levent GÖKREM³ ve A.Hakan YAVUZ⁴

^{1,2,4}Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 60150 TOKAT

³Gaziosmanpaşa Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Mekatronik Mühendisliği Bölümü, 60150 TOKAT

(Geliş / Received : 09.02.2016 ; Kabul / Accepted : 04.03.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, Tokat Meteoroloji İstasyonu Müdürlüğü'ne ait 2000-2010 yılları arasındaki günlük ortalama rüzgar hızlarına ait veriler kullanılarak, Tokat bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyeli istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Bölgenin rüzgar enerji potansiyelinin belirlenmesinde bölgede daha önce çalışılmamış olan Weibull, Rayleigh, Log-normal ve Gama dağılım fonksiyonları kullanılarak istatistiksel ortalama rüzgar hızları ve güç yoğunlukları hesaplanmıştır. Dağılımların parametrelerinin belirlenmesinde daha küçük standart sapma değerine sahip olan En Küçük Kareler Yöntemi kullanılmıştır. Dağılımların birbirlerine göre performanslarının kıyaslamasında kök ortalama karesel hata (RMSE) ve ortalama karesel hata (MSE) kriterleri kullanılmıştır. Ortalama rüzgar hız değerlerinin Şubat ve Mart aylarında yüksek Kasım ve Aralık aylarında düşük olduğu gözlenmiştir. MSE ve RMSE değerleri incelendiğinde Weibull dağılımının diğer yöntemlere göre daha güvenilir olduğu belirlenmiştir. En düşük MSE değeri 0.0011 ile Mart ayı olasılık dağılımında hesaplanmıştır. Hata aralıkları kullanılan dağılım fonksiyonlarına göre 0.0011 ile 7.9609 aralığında gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar hızı tahmini, Olasılık dağılım fonksiyonları, Weibull-Rayleigh Dağılımları, Rüzgar Enerjisi

Analyzing The Wind Characteristics of Tokat Region With Statistical Methods

ABSTRACT

Wind energy potential was analyzed with statistical methods by using daily average wind speed data of 2000-2010 year of Tokat Meteorology Station. Statistical average wind speed and power density were calculated by using Weibull, Rayleigh, statistical log-normal and gamma distribution functions that have not been used before in this region. Least squares method that has a smaller standard deviation was used to determine the parameters of distributions. Root mean square error (RMSE) and mean square error (MSE) criteria were used in the comparison of distribution performance. The average wind speeds were observed lower in February and March, higher in November and December. When the MSE and RMS values examined Weibull distribution is more reliable than other methods. The lowest MSE value 0.0011 is calculated probability distribution of March. According to the distribution function error range are observed in the range of 0.0011 to 7.9609.

Keywords : Estimation of wind velocity, Probability distribution functions, Weibull-Rayleigh distributions, Wind energy

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen ülkelerin sanayi alanında yaptığı yatırımlar ve nüfus oranında hızlı yükseliş enerjiye olan talebin de hızla artmasına neden olmaktadır. Ülkelerin enerji alanındaki bağımlılıkları ekonomik ve sosyal kalkınma potansiyellerini yansıtan temel ölçeklerden biridir. Bu nedenle enerji tüketimi ve sosyal kalkınma arasında doğrusal bir ilişki vardır [1]. Enerjiye olan talepteki bu hızlı artış aynı zamanda fosil kökenli yakıtların zaman içerisinde azalmasına sebep olmaktadır. Bu durum ülkeleri yenilenebilir enerji kaynaklarına yöneltmiştir. Yenilenebilir enerji kaynaklarında; fosil kökenli yakıtların kullanılması sırasında açığa çıkan ve küresel

ısınmaya sebep olan sera gazı etkisi görülmemektedir. Ayrıca yenilenebilir enerji kaynakları ekonomik dalgalanmalardan da doğrudan etkilenmemektedir.

Bu durum başta rüzgar enerjisi olmak üzere, güneş enerjisi, jeotermal, biyokütle ve dalga enerjisi alanında yatırımların önünü açmıştır. Rüzgar enerjisinin kullanımına bir göz atıldığında, yüzyıllar boyunca kullanılan bir enerji türü olduğu görülür. Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü (DMİ) tarafından 50 m yükseklikte yapılan rüzgâr hız ölçümlerine göre 6.5 m/s'nin üzerindeki rüzgâr hızları değerlendirildiğinde, Türkiye kara rüzgâr potansiyeli 131756.40 MW; rüzgâr hızının 7.0 m/s'nin üzerinde olduğu bölgeler dikkate alındığında kara rüzgâr potansiyeli 48000 MW olarak belirlenmiştir. Ayrıca rüzgâr hızının 6.5 m/s'nin üzerinde olduğu alanlarda Türkiye deniz rüzgâr potansiyeli 17393.20 MW olarak tespit edilmiştir [2,3].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: cem.emeksiz@gop.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 481-489

(Şekil 1) incelendiğinde dikkate değer bir rüzgar enerjisi potansiyeline sahip olduğu görülmektedir.

2015 yılı itibarı ile Tokat bölgesi'nde PEM En A.Ş.'nin işletmesini yaptığı 40MW'lık kurulu güce sahip bir RES santrali mevcuttur. Ayrıca Akyurt RES 12.8 MW ve Bereketli RES 32MW olmak üzere toplam 44.8 MW'lık RES kurulum aşamasındadır (Şekil 2) [12]. Tokat RES'te 2.4MW'lık rüzgar türbinleri kullanılmıştır .

2000-2010 yıllarına ait rüzgar hızı verileri kullanılarak, rüzgar enerjisi bakımından Tokat bölgesinin rüzgar enerjisi potansiyeli istatistiksel olarak çıkartılmıştır. İstatistiksel yöntemlerden Weibull, Rayleigh, Gama ve Log-Normal dağılım fonksiyonları kullanılmış ve en iyi performansı Weibull dağılım fonksiyonu göstermiştir.

2. RÜZGAR ENERJİSİ (WIND ENERGY)

Rüzgar enerjisi alternatif enerji kaynaklarının başında gelmektedir. Rüzgar enerjisi sistemlerinin temel girdisi rüzgarlardır. Rüzgarın kinetik enerjisini mekanik veya elektrik enerjisine çevirip kullanıma sunan sistemlerde rüzgar enerjisi çevrim sistemleridir. Rüzgar enerjisinin temel kaynağı ise güneştir. Gerekli enerjisini güneşten alan bir ısı makinesi olarak nitelenebilecek olan atmosferde; ısıl potansiyel farklara sahip olan hava kütleleri, daha soğuk ve yüksek basınç alanı olan bir noktadan, daha sıcak ve alçak basınç alanına hareket ederler. Isı enerjisinin kinetik enerjiye dönüştüğü bu doğa olayındaki hava kütlesi hareketine, rüzgar adı verilir [13].

Rüzgar enerjisinin temiz, ücretsiz ve sınırsız bir kaynak özelliğine sahip olması, enerji arzını çeşitlendirerek enerji güvenliği sağlaması, dış kaynaklı yakıt ithaline ihtiyaç duymaması, rüzgar enerjisi çevrim sisteminin çok çabuk inşa edilebilmesi ve sistemin inşa edildiği alanda tarım ve sanayi faaliyetlerinin de yürütülebilmesi gibi çok sayıda sağladığı avantajdan ötürü bu sektöre

ülkemizde hızlı bir şekilde yatırım yapılmaktadır. Geleneksel yakıtların aksine, enerji güvenliği açısından yakıt maliyetlerini ve uzun dönemli yakıt fiyatı risklerini eleyen, ekonomik, politik ve tedarik riskleri açısından diğer ülkelere bağımlılığı ortadan kaldıran, yerli ve her zaman kullanılabilir bir kaynak olması rüzgar enerjisinin önemini daha da arttırmaktadır [14]. Türkiye'deki rüzgar enerjisi potansiyel belirleme çalışmalarını yoğunluk kazanmış olmasına rağmen yenilenebilir enerji kaynakları ile ilgili bir enerji politikamızın tam olarak oturmaması nedeni ile bu çalışmalar yavaş ilerlemektedir.

Rüzgar hareket eden ve yer değiştiren hava kütesini temsil ettiği için, taşıdığı enerjiyi elde etmek adına yapılan hesaplamalar hareket eden cisimlerin enerjisini ifade eden denklemden türetilmiştir, [15,16];

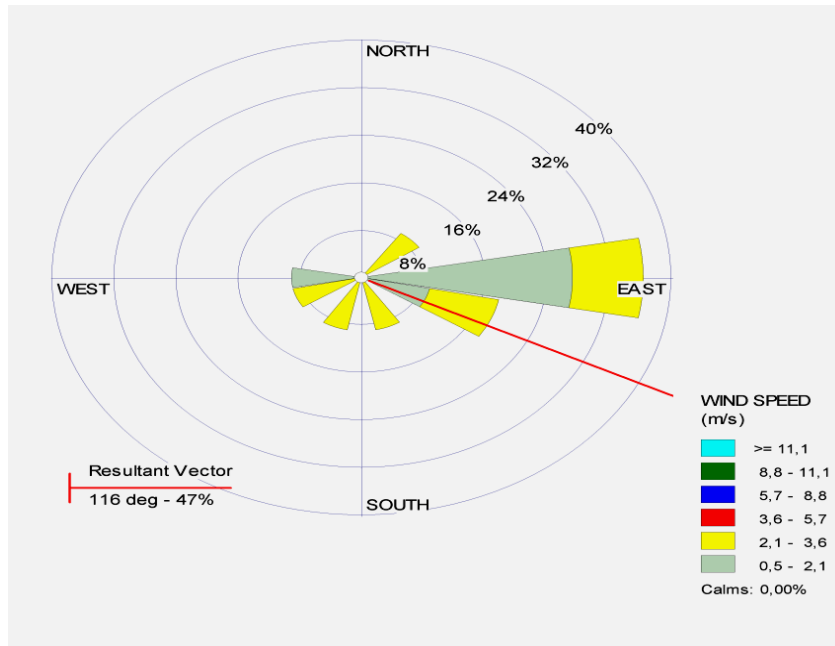
$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Formüle E kinetik enerjiyi, m taşınan hava kütesini, v rüzgar şiddetini ifade etmektedir. Rüzgarın birim zamanda taşıdığı enerjiyi, yani gücünü watt (W) cinsinden bulmak için 2' nolu denklemden faydalanılır;

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2)$$

Denklemden A; rotor süpürme alanını, ρ ; havanın yoğunluğunu göstermektedir. Havanın yoğunluğu deniz seviyesinde ve 15,5 °C sıcaklık derecesinde 1,225 kg/m³ olarak kabul edilir. Ölçüm yapılan yükseklik değiştikçe buna bağlı olarak değişen sıcaklık ve basınç farkı sebebiyle havanın yoğunluğu da değişir [17]. Bu çalışmada hava yoğunluğu 1,225 kg/m³ olarak kabul edilmiştir.

Ölçüm yapılan meteoroloji istasyonuna ait 2000-2010 yılları arasındaki hız ve yön dağılımlarının yer aldığı rüzgar gülü WRPLOT View Programı kullanılarak elde edilmiştir (Şekil3). Rüzgar hızları ve rüzgar esme



Şekil 3. Tokat Bölgesi Rüzgar Gülü (Wind Rose of Tokat Region)

frekansları şekilde % olarak ifade belirtilmiştir. Rüzgar gücü incelendiğinde Tokat bölgedeki rüzgar hızının yaklaşık % 56'sı 2.1-3.6 m/s aralığında % 44'ü 0.5-2.1 m/s rüzgar hızı aralığında olduğu görülmüştür. Rüzgarın baskın esme yönü Doğu (East), Güney-Doğu (East-South) tarafından olduğu görülmektedir.

3. İSTATİSTİKSEL ANALİZ METODLARI (STATISTICAL ANALYSIS METHODS)

Bir bölgenin rüzgar karakteristiğinin belirlenmesinde çeşitli dağılım fonksiyonlarından faydalanılmaktadır. Bölge için belirlenen en uygun dağılım ekonomik açıdan da fayda sağlar. Literatür çalışmaları incelendiğinde rüzgar hızı frekans dağılımı Gamma, log normal, Rayleigh gibi farklı dağılımlar kullanılarak gösterilmektedir. Bunun yanı sıra özellikle iki parametrelili Weibull dağılımı bir çok bölgedeki rüzgar karakteristiğinin belirlenmesinde daha çok tercih edilmektedir. Bu yöntemin tercih edilmesindeki etkenler arasında, rüzgar dağılımına uyum sağlayıp esnek bir yapı içermesi ve parametre sayısının az olup kolay belirlenmesi yer almaktadır [18].

3.1. Weibull Dağılımı (Weibull Distribution)

Weibull dağılımı, temelde şekil (k) ve ölçek (c) olmak üzere iki parametreden oluşan bir dağılımdır. Weibull dağılımının olasılık yoğunluk fonksiyonu;

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (3)$$

Şeklinde ifade edilir. Olasılık yoğunluk fonksiyonu $f(v)$, herhangi bir anda V hızının gözlenme olasılığını vermekte olup kümülatif dağılım fonksiyonu $F(v)$ ise herhangi bir anda gözlenen hızın V hızına eşit veya daha küçük olma olasılığını belirtmektedir ve eşitlik (4) ile ifade edilmektedir [19,20].

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (4)$$

Ortalama rüzgar hızı değeri eşitlik (5) ile hesaplanır.

$$v_{ort} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (5)$$

c ve k parametrelerinin hesaplanmasından sonra ortalama rüzgar gücü yoğunluğu;

$$P_w = \frac{1}{2}\rho c^3 \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (6)$$

ile hesaplanır.

3.2. Rayleigh Dağılımı (Rayleigh Distribution)

Rayleigh dağılımı için ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu ise sırasıyla (7) ve (8) eşitlikleri kullanılarak elde edilebilir.

$$v_m = c\sqrt{\frac{\pi}{4}} \quad (7)$$

$$P_R = \frac{3}{\pi}\rho v_m^3 \quad (8)$$

3.3. Log-Normal Dağılımı (Log-Normal Distribution)

Rassal olarak değişen rüzgar hızı verilerinin doğal logaritması alındığında olasılık dağılımı normal dağılıyorsa bu durum kısaca Log-normal dağılım terimiyle ifade edilir. Log-Normal dağılımına ait olasılık yoğunluk fonksiyonu eşitlik 9 ile hesaplanmaktadır [21].

$$f(x) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(v)-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \times \frac{1}{\sigma v\sqrt{2\pi}} \quad (9)$$

Log-normal dağılımının kümülatif dağılım fonksiyonu ise eşitlik 10' da verilmektedir [22].

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln v - \mu}{\sigma}\right) \quad (10)$$

Burada, μ yer parametresi ve σ ölçek parametresidir. Ortalama rüzgar hızı,

$$V_{log-normal} = e^{\mu + \left(\frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad (11)$$

şeklinde olup ortalama rüzgar gücü yoğunluğu ise,

$$P_L = \frac{1}{2}\rho e^{3\left(\mu + \left(\frac{\sigma^2}{2}\right)\right)} \quad (12)$$

3.4. Gamma Dağılımı (Gamma Distribution)

Eğer n rassal olarak değişen rüzgar hızı gözlem değerlerini temsil eden tamsayı cinsinden bir değer ise, Gamma dağılımı n tane üstel dağılım gösteren rassal değişkenlerin toplamını temsil etmektedir. Bu durum coğrafi konum ve iklim rejimine bağlı olarak değişkenlik gösteren rüzgar hızı verisi için de geçerlidir [23]. Gamma dağılımına ilişkin olasılık yoğunluk ve kümülatif dağılım fonksiyonu eşitlik 13 ve 14' de verilmektedir [24].

$$f(x) = \frac{x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}}}{b^a \Gamma(a)} \quad (13)$$

$$F(x) = \frac{\Gamma_V}{\Gamma(a)} \quad (14)$$

Burada b ölçek parametresine, a şekil parametresine ve Γ ise gamma fonksiyonuna karşılık gelmektedir.

Ortalama rüzgar hızı ve güç yoğunluğu ise;

$$V_{gama} = b \cdot a \quad (15)$$

$$P_G = \frac{1}{2}\rho(a \cdot b)^3 \quad (16)$$

şeklinde verilmektedir.

Dağılımların değerlendirilmesinde kök ortalama karesel hata (RMSE) ve ortalama karesel hata (MSE) kriterleri kullanılmıştır.

$$RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(Y_i - X_i)\right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^N(Y_i - X_i) \quad (18)$$

4. ANALİZ VE BULGULAR (ANALYSIS AND RESULTS)

Bu çalışmada, Tokat' ta (40° 18' K; 36° 33' D) 2000-2010 yılları arasındaki ortalama günlük rüzgar hızı verileri kullanılarak istatistiksel analizleri gerçekleştirilmiştir. Rüzgar hızı verileri yerden 10 m yükseklikte ve 608 m rakımdaki Tokat bölgesi içerisinde Meteoroloji Gözlem

İstasyonu tarafından ölçülmüştür. Tokat bölgesinin fiziki konumu Şekil 4 'de görülmektedir.

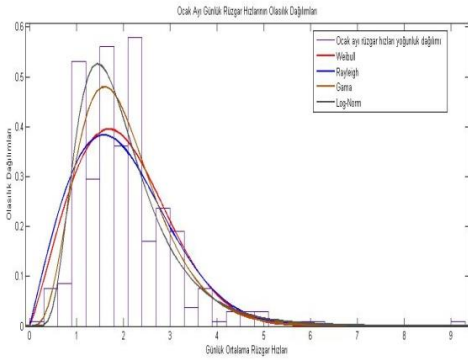
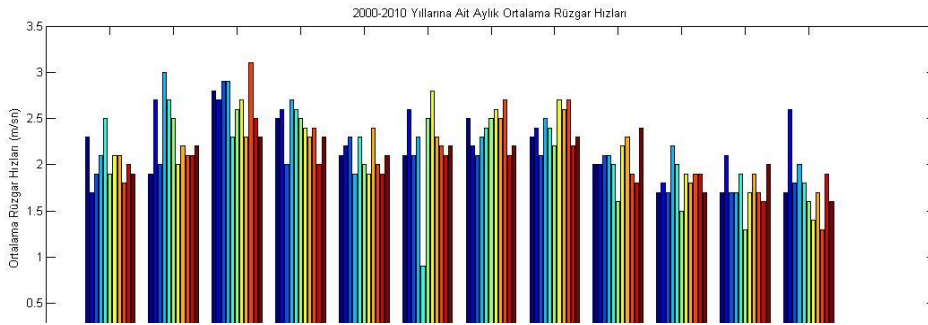
2000-2010 yılları arasındaki toplam 11 yıllık günlük ortalama veriler; her yılın kendi ayları arasında sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmaya bağlı olarak her



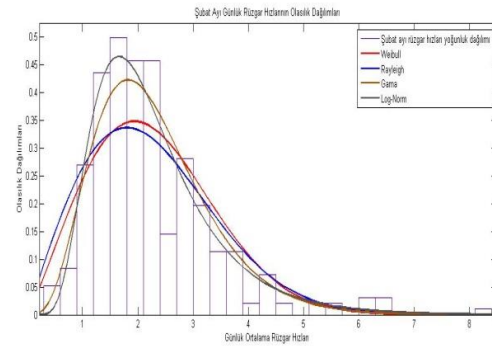
Şekil 4. Ölçümlerin yapıldığı Tokat ili fiziki haritası (Physical map of Tokat city)

Tokat bölgesine ait 2000-2010 yılları arasındaki aylık ortalama rüzgar hız değerleri Şekil 5' de görülmektedir. Yüksek ortalama rüzgar hız değerleri Şubat ve Mart ayları içerisinde gözlenmektedir. Ortalama 3 ile 3.5 m/s arasında meydana gelmektedir.

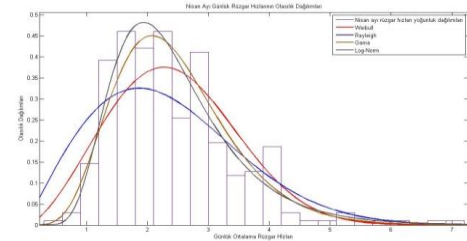
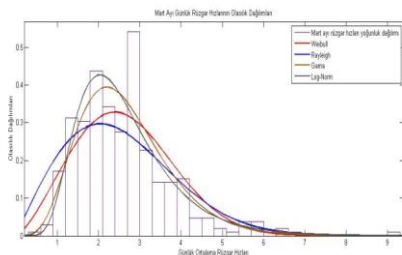
bir aya ait olasılık dağılımları ve analizler neticesindeki ortalama hız ve güç yoğunluğu değerleri saptanmıştır.



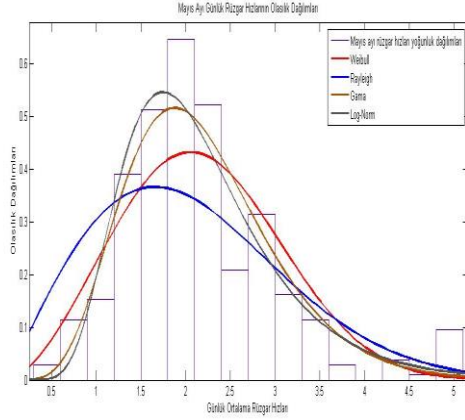
a) Ocak Ayı Dağılımı



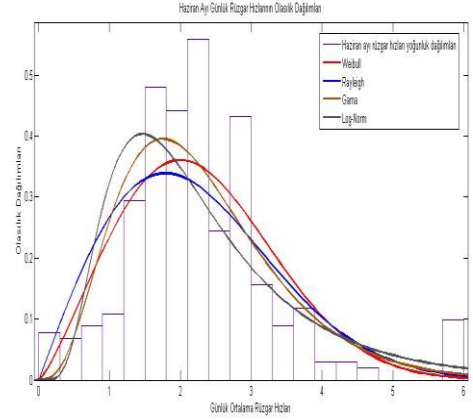
b) Şubat Ayı Dağılımı



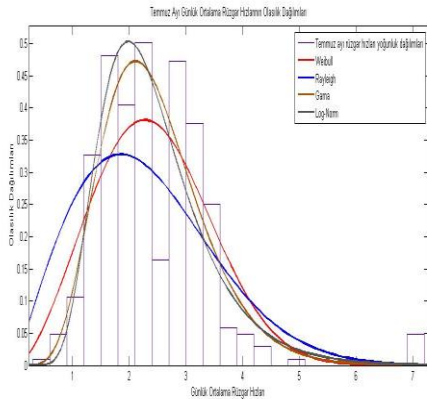
d) Nisan Ayı Dağılımı



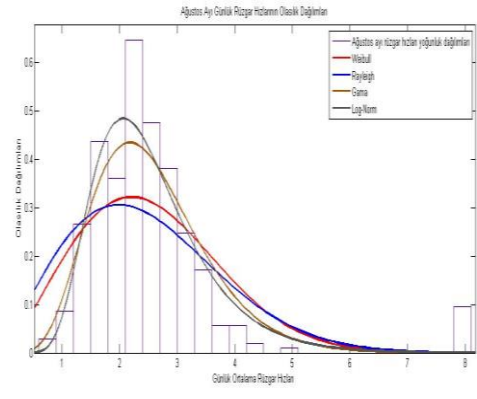
e) Mayıs Ayı Dağılımı



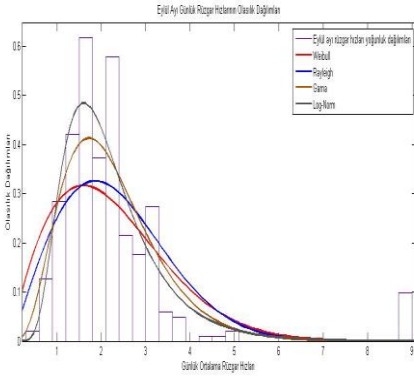
f) Haziran Ayı Dağılımı



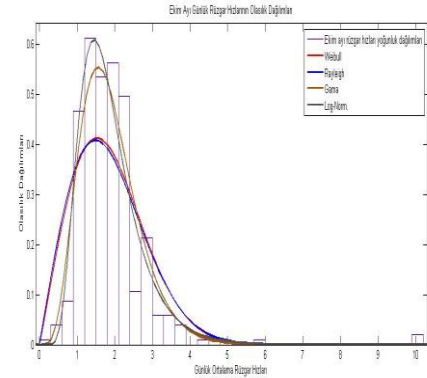
g) Temmuz Ayı Dağılımı



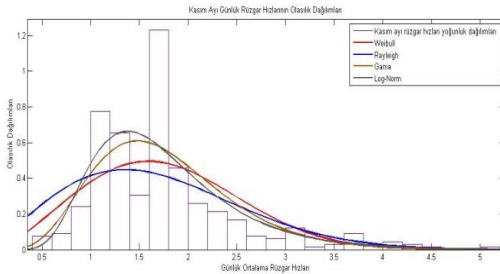
h) Ağustos Ayı Dağılımı



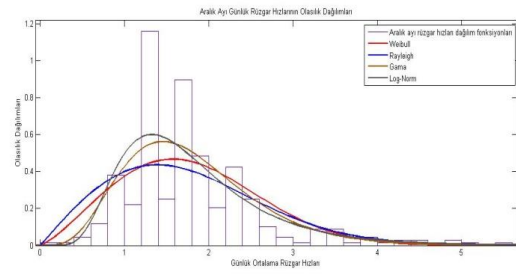
ı) Eylül Ayı Dağılımı



j) Ekim Ayı Dağılımı



k) Kasım Ayı Dağılımı



l) Aralık Ayı Dağılımı

Şekil 6. Aylara Göre Rüzgar Hızı Olasılık Dağılımları (Probability Distribution of Wind Speed According to Months)

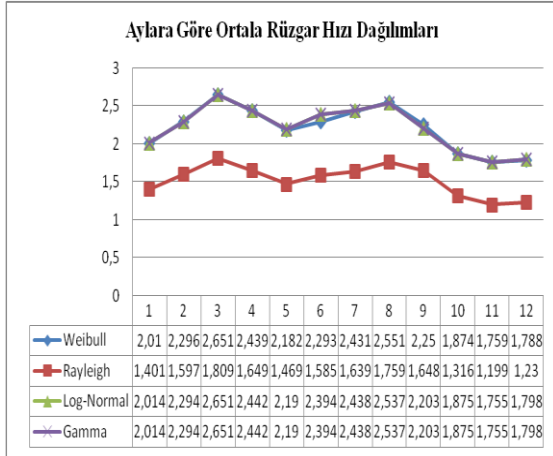
Aylara göre rüzgar hızı olasılık dağılımları Şekil 6'da görülmektedir.

Yapılan analizler neticesinde aylara göre elde edilen ortalama rüzgar hız ve güç dağılımları Şekil 7' de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde ortalama hız dağılımları içerisinde en yüksek değer Weibull ve Gamma dağılımlarında 2.651 m/s olarak, en düşük değer ise 1.199 m/s olarak Rayleigh dağılımında hesaplanmıştır. Güç dağılımları incelendiğinde en yüksek dağılım 18.519 W ile Weibull dağılımında Mart ayında elde edilmiştir.

parametreleri cinsinden karşılaştırdığımızda; en düşük hata oranları ortalama rüzgar hızı için % 0.11, ortalama güç yoğunluğu için ise % 0.88 olarak Weibull dağılımında görülmüş ve Weibull dağılımının daha güvenilir ve gerçekçi sonuçlara yakın değerler gösterdiği saptanmıştır.

5. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada 4 farklı dağılım fonksiyonu kullanılmıştır. Bunlar Weibull, Rayleigh, Gamma ve Log-Normal.



Şekil 7. Aylara Göre Ortalama Rüzgar Hızları ve Güç Yoğunluğu Dağılımları (Average Wind Speed and Power Density Distribution According to Months)

Çizelge 1 incelendiğinde ise ortalama rüzgar hızları ve güç yoğunluklarına göre hesaplanan hata parametreleri yer almaktadır. Kullanılan dağılım fonksiyonlarını hata

Yapılan istatistiksel analizler neticesinde ortalama rüzgar hız değerlerinin en yüksek Mart ayında 2.651 m/s olarak belirlenmiştir. En yüksek ortalama rüzgar hız değeri Weibull ve Gamma dağılımlarında görülmüştür. En

Çizelge 1. Ortalama rüzgar hızları ve güç yoğunluklarına göre hesaplanan hata parametreleri (Error parameters are calculated according to the average wind speed and power density)

Dağılımlar	Hata Analizleri	Ock	Şbt.	Mrt.	Nisn.	Mys.	Hzn.	Tem	Ağus.	Eyl.	Ekm.	Ksm.	Arık.
Weibull	MSE (V)	0.0012	0.0020	0.0011	0.0014	0.0035	0.0088	0.0637	0.0034	0.0046	0.1900	0.2666	0.2817
	RMSE (V)	0.0342	0.0447	0.0338	0.0376	0.0592	0.0938	0.2524	0.0583	0.0678	0.4358	0.5163	0.5308
	MSE (P)	0.0088	0.0270	0.0151	0.0158	0.0311	0.0870	0.7316	0.0419	0.1364	1.3888	1.7999	1.4131
	RMSE (P)	0.0938	0.1643	0.1228	0.1256	0.1763	0.2949	0.8553	0.2046	0.3693	1.1784	1.3416	0.2967
Rayleigh	MSE (V)	0.6078	0.6940	0.8409	0.7916	0.7165	0.7168	0.8627	0.7954	0.5876	0.7490	0.8266	0.8497
	RMSE (V)	0.7790	0.8331	0.9170	0.8897	0.8465	0.8466	0.9288	0.8919	0.7665	0.8654	0.9092	0.9218
	MSE (P)	3,3612	4,9893	7,9609	6,3084	4,5609	5,1537	7,0620	7,0438	4,2025	4,0950	4,1335	4,4767
	RMSE (P)	1,8333	2,2336	2,8215	2,5116	2,1356	2,2701	2,6574	2,6540	2,0502	2,0236	2,0331	2,1158
Log-Normal	MSE (V)	0.0052	0.0027	0.0011	0.0016	0.0045	0.0922	0.0707	0.0174	0.0326	0.1910	0.2706	0.2917
	RMSE (V)	0.0719	0.0523	0.0338	0.0400	0.0673	0.3037	0.2659	0.1319	0.1805	0.4370	0.5202	0.5401
	MSE (P)	0.0393	0.0498	0.0151	0.0177	0.0408	0.9572	0.8097	0.2124	0.3021	1.3954	1.8232	1.9970
	RMSE (P)	0.1982	0.2231	0.1228	0.1330	0.2019	0.9783	0.8998	0.4608	0.5496	1.1812	1.3502	2.0576
Gama	MSE (V)	0.0048	0.0050	0.0039	0.0046	0.0065	0.0834	0.0677	0.0034	0.0144	0.1900	0.2706	1,4344
	RMSE (V)	0.0693	0.0710	0.0624	0.0678	0.0806	0.2887	0.2602	0.0583	0.1200	0.4358	0.5202	0.5447
	MSE (P)	0.0393	0.0270	0.0151	0.0158	0.0408	0.9572	0.7316	0.2124	0.3021	1.3888	1.8232	1.9970
	RMSE (P)	0.1982	0.1643	0.1228	0.1256	0.2019	0.9783	0.8553	0.4608	0.5496	1.1784	1.3502	1.4131

düşük rüzgar hızı Rayleigh dağılımının kullanıldığı Mart ayında 1.199 m/s olarak hesaplanmıştır. Kullanılan dağılım fonksiyonları açısından performans değerlendirmesi yapıldığında, hata parametrelerinden olan MSE ve RMSE Weibull dağılımında daha düşük çıkmıştır. Bu sonuç Weibull dağılımının rüzgar hızı potansiyelinin belirlenmesinde daha güvenilir olduğunu göstermiştir. Özellikle Weibull dağılımı hata parametreleri incelendiğinde en düşük 0.0011 en yüksek 0.2817 değerleri arasında sonuçlar göstermiştir. Güç yoğunlukları dağılımı bakımından değerlendirildiğinde Mart ve Ağustos aylarında güç değerlerinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Rüzgar hızı verileri meteoroloji gözlem istasyonunun bulunduğu konumdan elde edildiği için çalışmada elde edilen rüzgar enerjisi potansiyeli bu konuma aittir. Şekil 1 incelendiğinde Tokat bölgesinde değerlendirilmeyi bekleyen rüzgar hızlarının bulunduğu konumların da varlığı görülmektedir. Bu çalışma ile Tokat bölgesinin rüzgar hızı değerlerinin yüksek olduğu konumları için yapılacak ölçümler Weibull dağılımı ile incelendiğinde, yatırımcılar için uygun potansiyellerin olduğunu göstermek adına öncü olacağı düşünülmektedir. Bir sonraki çalışma için yüksek rüzgar hızı potansiyeline sahip konumlardan alınan veriler üzerine çalışma yapılması düşünülmektedir.

Simgeler ve Kısaltmalar (Symbols and Abbreviations)

RMSE	: Kök ortalama karesel hata
MSE	: Ortalama karesel hata
E	: Kinetik enerji
m	: Taşınan hava kütlesi
ρ	: Hava yoğunluğu
P	: Rüzgar gücü
c	: Weibull ölçek parametresi
k	: Weibull şekil parametresi
$f(v)$: Weibull olasılık dağılım fonksiyonu
$F(V)$: Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu
v_{ort}	: Weibull ortalama rüzgar hızı
P_w	: Weibull ortalama güç yoğunluğu
v_m	: Rayleigh ortalama rüzgar hızı
P_R	: Rayleigh ortalama güç yoğunluğu
$V_{\log-normal}$: Log-Normal ortalama rüzgar hızı
P_L	: Log-Normal güç yoğunluğu
V_{γ}	: Gamma ortalama rüzgar hızı
P_G	: Gamma ortalama güç yoğunluğu

KAYNAKLAR

[1] Koç, E., Kaplan, E., "Dünyada ve Türkiye'de Genel Enerji Durumu-I Dünya Değerlendirmesi," *Termodinamik Dergisi*, 187, 70-80, (2008).

- [2] MMO, "Türkiye'nin Enerji Görünümü", Yayın No: MMO/588, *TMMOB Makina Mühendisleri Odası*, Ankara, (2012).
- [3] Mavi Kitap, Enerji Tabii ve Kaynaklar Bakanlığı ile Bağlı ve İlgili Kuruluşlarının Amaç ve Faaliyetleri, *Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı*, Ankara, (2011).
- [4] Kurban M., "Elektrik Enerjisi Üretiminde Rüzgar Enerjisinin Yeri ve Önemi", *I. Ege Enerji Sempozyumu ve Sergisi*, Denizli, 22-24 Mayıs, (2003).(özet)
- [5] Eskin, N., Artar, H., Tolun, S., "Wind energy potential of Gökçeada Island in Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2006).
- [6] Segura, J.V., Lambert, T.W., "Modern Estimation Of The Parameters of The Weibull Wind Speed Distribution For Wind Energy Analysis", *Journal Of Wind Energy And Industrial Aerodynamics*, 85:75-84, (2000).
- [7] Kose, R., Ozgur, M. A., Erbas, O., Tugcu, A., "The Analysis of Wind Data and Wind Energy Potential in Kütahya, Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 8, 277-288, (2004).
- [8] Bivona, S., Burlon, R., Leone, C., "Hourly Wind Speed Analysis in Sicily", *Renewable Energy*, 28(9):1371-1385, (2003).
- [9] Eskin, N., Artar, H., Tolun, S., "Wind Energy Potential of Gökçeada Island in Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 839-851, (2008).
- [10] Ulgen, K., Genc, A., Hepbasli, A., Oturanc, G., "Assessment of Wind Characteristics for Energy Generation", *Energy Sources*, 26, 1227-1237, (2004).
- [11] Durak, M., Şen, Z., "Wind Power Potential in Turkey and Akhisar Case Study", *Renewable Energy*, 25, 463-472, (2002).
- [12] *Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği*, "Türkiye Rüzgar Santralleri Atlası" Temmuz, (2015).
- [13] Özdamar, A., "Dünya ve Türkiye'de Rüzgar Enerjisinden Yararlanılması Üzerine Bir Araştırma", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6 (2-3): 133.145, (2000).
- [14] Özpınar, M.A., "Yenilenebilir Enerji Santrallerinde Yapay Sinir Ağları Yöntemiyle Enerji Üretimiminin Modellenmesi ve Planlanması", *Doktora Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, 235, (2007).
- [15] Altuner, S., "Rüzgâr Enerjisi Potansiyeli Ölçümü", *Yüksek Lisans Tezi*, (2008).
- [16] Akdağ, S.A., "Rüzgar Enerjisi Potansiyeli Ve Ekonomik Analizinde Weibull Dağılımının Kullanımı", *Yüksek Lisans Tezi*, (2008).
- [17] Patel, R., "Wind and Solar Power Systems Design, Analysis and Operation", *CRC Press*, (2006).
- [18] Akdağ S.A., Güler Ö., "Weibull Dağılım Parametrelerini Belirleme Metodlarının Karşılaştırılması", *VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, UTES'2008, İstanbul, 17-19, (2008).
- [19] Akdağ S.A., Dinler A., "A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications", *Energy Convers Manag*, 50: 1761-1766, (2009).
- [20] Chang T.P., "Performance comparison of six numerical methods in estimating Weibull parameters for wind energy application", *Appl Energy*, 88: 272-282, (2011).

- [21] Bailey, R. L., and Dell, T. R., “Quantifying diameter distributions with the Weibull function”, *Forest Science*, 19: 97-104, (1973).
- [22] Darbandi, S., Aalami, M.T., and Asadi, H. “Comparison of Four Distributions for Frequency Analysis of Wind Speed”, *Environment and Natural Resources Research*, 2(1), 96-105, (2012) .
- [23] Mert, İ., Karakuş, C., “ Antakya Bölgesinde Rüzgâr Gücü Yoğunluğu ve Rüzgâr Hızı Dağılımı Parametrelerinin İstatistiksel Analizi”, *Politeknik Dergisi*, 18 (1) : 35-42 (2015).
- [24] Nelson, T. C., “Diameter distribution and growth of loblolly pine” *Forest Science*, 10: 105-115, (1964).

AISI 4140 Çeliğin Çok Yönlü Takımla Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülük Performansının Optimizasyonu

Ahmet Murat PİNAR^{*1}, Korcan FIRAT²

¹Celal Bayar Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü, Manisa/Turgutlu

²Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Muradiye/Manisa

(Geliş / Received : 10.02.2016 ; Kabul / Accepted : 30.04.2016)

ÖZ

Sunulan çalışma, AISI 4140 malzemenin kaba işleme şartlarında, (yüksek ilerleme ve talaş derinliği) kanal takımıyla tornalanmasını istatistiksel olarak tartışmaktadır. Taguchi'nin L8 ortogonal dizisi esas alınarak, kesme hızı, talaş kırıcı tipi ve uç yarıçapı faktörlerinin farklı seviyelerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. %95 güven seviyesinde yapılan analizler sonucunda, uç yarıçapının pürüzlülük üzerinde en anlamlı etkiye sahip olduğu, bunu talaş kırıcı tipi ve uç yarıçapı etkileşiminin izlediği ve optimum pürüzlülüğün 0,572 µm olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca her bir deney şartı için takım aşınma performansları araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Yüzey Pürüzlülüğü, Talaş Kırıcı Formları, Taguchi Metodu, Tornalama

Optimization of Surface Roughness Performance in The Turning of AISI 4140 Steel With Multi Directional Cutting Tool

ABSTRACT

Presented study discusses the turning of AISI 4140 steel with groove cutting tool at the rough machining conditions (high feed rate and depth of cut). Experiments based on Taguchi's L8 orthogonal array at the different levels of cutting speed, chip breaker type and nose radius conducted. As a result of the analyses carried out at the confidence level of 95%, nose radius has the most significant effect on the roughness followed by chip breaker type and chip breaker type–nose radius interaction, and optimum roughness is obtained as 0,572 µm. Furthermore, tool wear performances are observed for each experiment condition.

Keywords: Surface Roughness, Chip Breaker Forms, Taguchi Method, Turning

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

4140 çeliği, yüksek tokluk özelliği ve elverişli sertleştirme performansı ile endüstride çok tercih edilen bir malzemedir. Bu sebeple bu malzemelerin işlenebilirlik performansları birçok araştırmacı için çalışma konusu olmaktadır. Bu çalışmaların büyük bir kısmında yüzey pürüzlülüğü ve aşınma en çok araştırılan kalite karakteristiklerindedir. Aşağıda bu tür malzemelerin tornalanmasındaki işlenebilirlik karakteristiklerinin modellendiği ve optimizasyonlarının gerçekleştirildiği çalışmalar değerlendirilmektedir.

Sarma ve Dixid [1] gri dökme demirin tornalanmasında katkılı seramik kesici takım performansını yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü kriterlerine göre kuru ve hava soğutmalı olarak araştırmışlardır. Sinir ağlarının kullanıldığı analizler neticesinde, hava ile soğutmanın yüksek kesme hızlarında takım aşınmasını anlamlı olarak

azalttığı gözlemlenmiştir. Özel ve Karpaz [2] sertleştirilmiş AISI H13 ve 52100'ün CBN'le bitirme olarak işlenmesindeki deneysel verileri kullanarak yüzey pürüzlülüğünü ve takım aşınmasını sinir ağları ile modellemişlerdir. Bağımsız değişken olarak kesme kenar geometrisi, iş parçası sertliği, ilerleme oranı ve kesme hızı faktörleri seçilmiştir. Ayrıca, elde edilen model regresyon modelleri karşılaştırılmıştır. Risbood vd. [3] düşük karbonlu çeliğin kuru ve ıslak şartlarda HSS ve karbür takımlarla işlenebilirliğini yüzey pürüzlülüğü ve boyutsal doğruluk kriterine göre incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü, farklı kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliklerinde gerçekleştirilen deneylerde takım tutucunun radyal titreşiminin ve kesme kuvvetinin ivmelenmesinin geri besleme olarak alınmasıyla sinir ağları metoduyla modellenmiştir. Karayel [4] St52 çeliğin sementit karbür takımla tornalanmasında kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliği parametrelerinin yüzey kalitesi değişimine olan etkisini tahmin eden bir yazılım gerçekleştirmiştir. Pürüzlülük parametreleri olarak, R_a (ortalama yüzey pürüzlülüğü), R_t (maksimum

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: ahmet.pinar@cbu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 491-498

profil yüksekliği) ve R_q (profilin karelerin ortalamasının karekökü) parametreleri, ileri besleme çok katmanlı sinir ağları kullanılarak modellenmiştir. Abburi ve Dixit [5] Düşük karbonlu çeliğin HSS ve karbür takımla tormalanmasında sinir ağları ve bulanık küme teorisi kullanılarak bilgi tabanlı sistemi geliştirmişlerdir. Kesme hızı, ilerleme ve talaş derinliği parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri kuru ve ıslak şartlar için modellenmiş ve tahmin sonuçları sinir ağları metodu ile karşılaştırılmıştır. Ahmari [6] AISI 302 Ostenitik çeliğinin karbür takımla tormalanmasında takım ömrü, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü kalite karakteristiklerini incelemişlerdir. Kesme hızı, ilerleme oranı, talaş derinliği ve kesici uç yarıçapı faktörlerinin farklı seviyelerinde gerçekleştirilen 28 adet deney sonucu sinir ağları, yüzey yanıt ve regresyon analizi metotlarıyla değerlendirilmiştir. Ho vd [7]. adaptif sinirsel bulanık sonuç sistemini kullanarak yüzey resmi ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkiyi belirlemişler ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini modellemişlerdir. S45C çelik malzemenin tungsten karbür takımla işlenmesinde kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliği parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini yüzey görüntüsünün gri seviyesi kullanılarak tahmin edilmiştir. Davim vd. [8] otomat çeliğinin sementit karbür takımla işlenmesini R_a ve R_t kriterlerine göre incelemişlerdir. İlerleme oranı, kesme hızı ve talaş derinliği faktörlerinin farklı seviyelerinde Taguchi'ye ait L27'lik ortogonal dizi esas alınarak gerçekleştirilen deney sonuçlarını ANN ile modellemişlerdir. Tzeng vd. [9] SKD 11 yüksek karbonlu yüksek kromlu alaşım takım çeliğinin tormalanmasında, dairesellik ve yüzey pürüzlülüğü kalite karakteristiklerini Taguchi ve gri ilişki analizi yöntemleri ile optimize etmişlerdir. İşleme parametresi olarak 3 farklı seviyede kesme hızı, ilerleme oranı, talaş derinliği ve kesme sıvısı oranı kullanılmıştır. Manna ve Salodkar [10] EO300 alaşım çeliğinin PVD kaplı sementit karbürle tormalanmasında ortalama pürüzlülüğü dinamik programlama, Taguchi yöntemi ve regresyon analizi ile araştırmışlardır. Kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliği faktörlerinin farklı seviyelerinde L27 ortogonal dizi esas alınarak gerçekleştirilen deneyler Taguchi 'ye ait sinyal/gürültü (S/N) oranı ve ANOVA ile değerlendirilmiştir. Kopac vd. [11] sıcak haddelenmiş C15E4 çeliklerin sermet takımlarla tormalanmasında yüzey pürüzlülüğünü Taguchi yöntemiyle incelemişlerdir. Deney sisteminde iki seviyeli kesme hızı, (250 ve 400 m/dak), kesici takım malzemesi (sermet ve sermet+TiN) çekme çapı ($\varnothing 40$ ve $\varnothing 34$), talaş derinliği (0,3 ve 0,5 mm) ve Ardışık kesme (birinci talaş ve ikinci talaş) parametreleri ile birlikte L16 ortogonal dizi kullanılmıştır. Buna göre TiN (PVD) kesici takım kaplamasının yüzey pürüzlülüğü üzerinde pozitif bir etkisinin olduğu, buna ek olarak, kesme hızının en anlamlı parametre olduğu gözlemlenmiştir. Davim [12] 95MnPb28k serbest imalat çeliği malzemenin sementit karbür uçla işlenmesinde, yüzey kalitesine göre optimum kesme şartlarını Taguchi yöntemiyle belirlemiştir. Kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliği

faktörlerinin ortalama yüzey pürüzlülüğü ve maksimum profil yüksekliği üzerindeki etkileri L27 ortogonal dizi, varyans analizi ve regresyon analizi ile incelenmiştir. Davim ve Figueira [13] ısıtma işlem görmüş soğuk iş takım çeliğinin (60 HRC) seramik takımla işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve özellikli kesme basıncı üzerindeki etkileri Taguchi metoduyla değerlendirmişlerdir. İşleme parametresi olarak kesme hızı ilerleme oranı ve diğer çalışmalardan farklı olarak işleme zamanı 3 farklı seviyede incelenmiştir. Taguchi 'ye ait L27 ortogonal diziyeye göre oluşturulan deney sistemi %95 güven seviyesinde varyans analizi ile değerlendirilmiştir. Nalbant vd. [14] AISI 1030 çeliğinin TiN kaplı sementit karbür takımla işlenebilirliğini yüzey pürüzlülüğüne göre araştırmışlardır. Uç yarıçapı, talaş derinliği ve ilerleme oranı faktörlerinin ana etkileri ve optimum seviyeler Taguchi metoduyla belirlenmiştir. Yang ve Tang [15] Taguchi metodunu kullanarak S45C çeliğinin tungsten karbür takımla tormalanmasında optimum yüzey pürüzlülüğünü ve takım ömrünü ve bunları sağlayan parametreleri belirlemişlerdir. Kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliği faktörlerinin 3 farklı seviyelerinin kullanıldığı L9 ortogonal diziyeyi, S/N oranı ve varyans analizini kullanmışlardır. Yüzey pürüzlülüğünün değişiminde, tüm faktörlerin anlamlı olduğu %81,99'lük oranla ilerleme oranının en yüksek etkiye sahip olduğu bu parametreyi talaş derinliği (%12,46) ve kesme hızı (%5,29) izlemektedir. Aslan vd. [16] sertleştirilmiş AISI 4140 çeliğinin tormalanmasında kesme hızı ilerleme oranı ve talaş derinliği faktörlerinin yanak aşınması ve yüzey pürüzlülüğü performansını Taguchi metoduyla araştırmışlardır. Deneyler kuru şartlarda Al₂O₃+TiCN karışımı seramik kesici takımla gerçekleştirilmiştir. L27 ortogonal dizinin kullanıldığı deney sistemine ait sonuçlar varyans ve çoklu regresyon analizi ile değerlendirilmiştir.

Yukarıda özetlenen çalışmalar klasik sağ yan takımla gerçekleştirilmekte olup son dönemde hem kanal hem kesme hem de profil işleyebilen çok yönlü takımlar (MDT) giderek artan bir kullanıma sahip olmakta ve böylelikle takım sıfırlama ve değişimi gibi gereksiz zamanlar minimize edilmektedir. Pinar [17] AISI 1040 malzemenin bu takımlarla tormalanmasında yüzey pürüzlülüğü performansını geri yayınlı öğrenme algoritmasının kullanıldığı yapay sinir ağları ile modellemiştir. Kesme hızı ilerleme oranı ve talaş derinliği işlem parametrelerinin farklı seviyelerinde gerçekleştirilen deney sonuçları %8,14'lük hata ile tahmin edilmiştir. Aynı deney planının kullanıldığı bir başka çalışmada Pinar vd [18] %95 güven seviyesinde pürüzlülüğün optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. L27 ortogonal dizi esas alınarak gerçekleştirilen deney sonuçları ANOVA ve S/N oranı ile değerlendirilmiştir. Çok yönlü takımlara ait işlenebilirlik çalışmaları değerlendirilecek olursa; genel olarak çelik malzemelerin bitirme, orta ve kaba tormalanmasında kesme hızı, ilerleme oranı ve talaş derinliği faktörlerine ait modelleme ve optimizasyon çalışmalarının gerçekle-

tirildiği gözlemlenmiştir. Sunulan çalışmada, kaba işleme şartlarında (yüksek ilerleme ve talaş derinliği) kesme hızı, talaş kırıcı tipi ve uç radüsü parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve aşınma davranışı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Özellikle talaş kırıcı tipi ve uç yarıçapı bu takımlar için ilk kez araştırılmıştır. Deneyler kuru işleme şartları altında Taguchi L9 ortogonal dizi esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Sunulan çalışmada çok amaçlı kanal kalemyle AISI 4140 çeliği (Çizelge 1) iş parçasının işlenebilirliği istatistiksel olarak araştırılmıştır. İşlenebilirlik testleri, Fanuc OiTc kontrol ünitesine göre programlanan, fener mili maksimum hızı ve gücü sırasıyla 6000 dev/dak ve 5,5 kW olan Goodway GLS 150 CNC torna tezgâhında gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 1. AISI 4140 çeliğinin kimyasal içeriği ve mekanik özellikleri (The chemical composition and mechanical properties of AISI 4140)

Kimyasal İçerik							
Element	C	Mn	Si	Cr	S	P	Mo
%	0,41	0,83	0,21	0,9	0,027	0,027	0,18
Mekanik Özellikler							
Çekme Dayanımı (daN/mm ²)	115			Sertlik (HB30) (Yumuşak tavlama durumunda)			214
Akma Sınırı (daN/mm ²)	75			Sıcak Şekil Verme Sıcaklığı (C ⁰)			1020
Kopma Uzaması (%5d)	12						

Yüzey pürüzlülük ölçümleri Mahr M300 ölçme donanımı ve RD18 sürücü ünitesi ile kesme ve ölçme uzunluğu sırasıyla 0,8 mm ve 5,6 mm olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 1'de numunelerin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri görülmektedir.



Şekil 1. Numunelerin yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi (Surface roughness measurement of specimens)

Takım görüntüleme işlemi 20 ila 230 kat büyütebilen Dino-lite pro dijital mikroskopta gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. Kesici uçların görüntülenmesi (Monitoring of the inserts)

Kullanılan takımlar hem kesme hem kanal açma hem de profil tornalama işlemlerinde kullanılabilirdiğinden çok yönlü kesiciler olarak anılmaktadır. Aşağıda sipariş

numarası ve boyutsal özellikleri verilen SECO firmasına ait kater ve kesici uçlar kullanılmıştır (Şekil 3) Kesici uçlar (Ti(C,N)+Al₂O₃) Kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle elde edilmiştir.

Kater: CFIR 2020 K04

Talaş Kırıcı tipi: FT, MT

Kesici Uç : LCMF160408/04-0400-MT/FT TGP25

Part No.	Dimensions in mm						Weight kg	Seat size
	h	b	l ₁	f ₁	l ₂	a ₂		
CFIR/L 1616 H04	16	16	100	17,5	31	12	0,2	4
2020 K04	20	20	125	21,5	31	12	0,4	4
2525 H04	25	25	150	26,5	31	12	0,7	4
3225 P04	32	25	170	26,5	31	12	1,0	4

Size	Dimensions in mm		
	b ₁	l	s
160304	3,00	16,00	4,50
160360	3,00	17,13	4,50
160424	4,00	16,00	4,50
160488	4,00	17,24	4,50
160554	5,00	16,00	4,50

Tolerances:
 b₁ ± 0,05
 l ± 0,08
 s ± 0,04

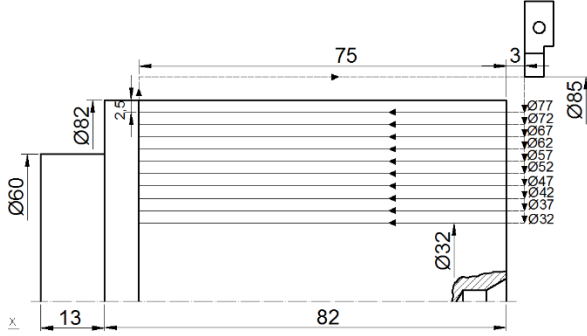
mm-version

Distance cutting edge near support

Şekil 3. Kullanılan kater ve uçlara ait özellikler (Properties of cutting tool)

Her bir deney daha önce belirtildiği gibi 2,5 mm talaş derinliğinde, 75 mm işleme uzunluğunda ve 0,25 mm/dev ilerleme oranında gerçekleştirilmiştir. Aşınma ile ilgili resimler ve pürüzlülükteki artış oranları (%R_{art}) yukarıda belirtilen işleme şartlarının 20 pasoda gerçekleştirilmesiyle belirlenmiştir. Başka bir ifadeyle

Ø82 mm'lik iki adet deney numunesi Ø32 olacak şekilde tormalanmıştır. Şekil 4'de deney numunesi boyutları ve deneylerde kullanılan CNC çevrimine ait takım yolları verilmiştir.



Şekil 4. Deney numunesi boyutları ve deneylerde kullanılan CNC çevrimine ait takım yolları (Dimensions of specimen and tool paths of CNC cycle employed in the trials)

Çalışmamızda Taguchi istatistiksel tasarım ve analiz metodu Minitab yazılımıyla kullanılmıştır. Taguchi yönteminin, karmaşık matematiksel hesaplamalara ihtiyaç duymaması, çok az sayıda deneyle gerçekleştirilebilmesi ve işlem parametrelerinin optimum seviyelerinin kolaylıkla belirlenmesinden ötürü endüstriyel ve bilimsel çalışmalarda çok yaygın olarak kullanılmaktadır [19]. Metot sistem, parametre ve tolerans tasarımı olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Taguchi metodunun uygulama adımları [19] (Application steps of Taguchi method)

Sistem tasarımı, kalite karakteristiğini etkileyen faktörlerin ve bunlara ait seviyelerin belirlendiği kısımdır ve bu alandaki teknik bilgi ve tecrübeye ihtiyaç duyulmaktadır. Parametre tasarımı, Taguchi metodunun en detaylı ve önemli kısmıdır. Burada, faktörlere ait optimum seviyeler belirlenmekte; bu seviyelerdeki bağımlı değişken (cevap) tahmin edilmekte ve yine bu seviyelerdeki doğrulama testleri gerçekleştirilmektedir. Tolerans tasarımı, belli güven seviyesinde, tahmin edilen cevabın alt ve üst sınırları belirlenmektedir. Son olarak, doğrulama deneylerine ait ortalama, bu aralığın içerisindeyse, metot sistemin optimizasyonunu yeterli doğrulukta gerçekleştirdiği kabul edilmektedir [19].

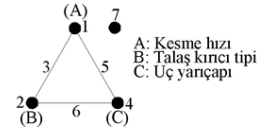
Gerçekleştirilen çalışmada, AISI 4140 çeliğinin çok amaçlı kanal kalemliyle kuru şartlarda tormalanmasında işlem parametrelerinin (Kesme hızı, talaş kırıcı tipi ve uç yarıçapı) ve bunlara ait ikili etkileşimlerin yüzey pürüzlülüğü (R_a , μm) ve takım aşınması üzerindeki etkileri Taguchi metoduyla istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bunlara ait işlem parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. İşlem parametreleri ve bunlara ait özellikler (Process parameters and their properties)

İşlem Parametreleri	Birimler	Seviyeler	
		1	2
Kesme hızı (A)	m/dak	205	280
Talaş kırıcı tipi (B)	-	FT	MT
Uç yarıçapı (C)	mm	0,4	0,8

Çalışmadaki deney sayısını ve doğruluğunu direkt olarak etkileyen OD'nin seçimi faktör ve etkileşimlerin toplam serbestlik derecesine dayalı olarak belirlenmektedir. Seçilen OD'ye ait serbestlik derecesi sistemin serbestlik derecesinden büyük ya da eşit olmalıdır [20, 21]. Deney sisteminin serbestlik derecesi, faktör ve etkileşimlerin serbestlik derecelerinin toplanmasıyla belirlenmektedir [20, 22]. İlgili faktöre ait serbestlik derecesi, o faktöre ait seviye sayısı-1 olarak belirlenmektedir. Buna göre, deney sistemimizde üç faktör bulunduğu için, faktörlere ait serbestlik derecesi $3 \times 1 = 3$ dür. Etkileşimlerde ise, etkileşimi oluşturan faktörlere ait serbestlik dereceleri çarpılarak hesaplanmaktadır. Sistemde 2 adet etkileşim bulunduğu için, bunlara ait serbestlik derecesi $2 \times 1 = 2$ dir. Bu veriler ışığında, sisteme ait serbestlik derecesi $3 + 2 = 5$ olarak hesaplanmaktadır. Deneylerde 7 sütun ve 8 satırdan oluşan 7 serbestlik dereceli L8'lik OD seçilmiştir (Şekil 6).

DENEY NO	SÜTUN NO						
	1	2	3	4	5	6	7
	A	B	AXB	C	AXC	BXC	-
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2



Şekil 6. L8 OD ve lineer grafik yöntemiyle faktör ve etkileşimlerin sütunlara atanması. (L8 OA and assigning the factors and interactions to the columns via linear graph)

Bu dizi aynı zamanda deney planını oluşturmada ve dizideki 8 satır, parametrelerin farklı kombinasyonlarındaki deneyleri ifade etmektedir. Dizinin sütunlarına da faktör ve etkileşimler atanmaktadır. Şekil 6'da lineer grafik yöntemi kullanılarak elde edilen atanma işlemi görülmektedir. Burada çokgenin köşelerindeki noktalar faktörleri ve bunları birleştiren çizgilerde etkileşimleri ifade etmektedir. Buna göre, dizideki birinci sütun kesme hızına, ikinci sütun talaş kırıcı tipine, dördüncü sütun uç yarıçapına ve geri kalanlar da ikili etkileşimlere atanmıştır.

3. İSTATİSTİKSEL ANALİZ (STATISTICAL ANALYSIS)

L8 OD esas alınarak gerçekleştirilen deneylere ait sonuçlar, Çizelge 3'de verilmektedir. Daima minimum yüzey pürüzlülüğü amaçlandığından her bir deneyin en düşük pürüzlülük sonuçları alınmıştır. Deneysel veriler, Minitab istatistik yazılımı kullanılarak S/N oranı ve varyans analizi (ANOVA) ile %95 güven seviyesinde analiz edilerek değerlendirilmiştir.

Çizelge 3. Yüze pürüzlülüğü deney sonuçları, ortalamalar ve S/N oranları

Deney no	Kesme hızı (A)	Talaş kırıcı tipi (B)	Uç yarıçapı (C)	R _{a1}	R _{a2}	R _{a3}	R _{aort}	S/N	%R _{art}
1	205	FT	0,4	1,887	1,898	1,962	1,916	-5,646	60,96
2	205	FT	0,8	0,719	0,667	0,565	0,650	3,737	37,38
3	205	MT	0,4	0,994	1,008	0,934	0,979	0,187	104,09
4	205	MT	0,8	0,812	0,787	0,824	0,808	1,855	43,07
5	280	FT	0,4	1,624	1,682	1,688	1,665	-4,427	184,44
6	280	FT	0,8	0,585	0,548	0,596	0,576	4,787	43,92
7	280	MT	0,4	1,267	1,234	1,245	1,249	-1,929	91,19
8	280	MT	0,8	0,923	0,991	0,901	0,938	0,553	38,49

3.1. S/N Oranı Analizi (S/N Ratio Analysis)

Taguchi metodu, sonuçları analiz etmek için elektrik kontrol teorisinden esinlenen sinyal-gürültü oranı olarak adlandırılan bir istatistiksel performans ölçümü kullanmaktadır [20, 23-24]. Bu teknikte, sinyal terimi çıkış karakteristiği için istenen değeri (ortalama) ve gürültü terimi de istenmeyen değeri (standart sapma) ifade etmektedir. S/N hedeflenen amaç fonksiyonuna (karakteristik değere) göre değişmektedir. S/N küçük değer iyi (SB), büyük değer iyi (LB), nominal değer iyi (NB) olmak üzere üç farklı kriterden biri olarak seçilir. Düşük yüze pürüzlülüğü daima tercih edildiğinden SB sinyal gürültü oranı seçilmiş olup, aşağıda buna ait eşitlik verilmektedir:

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

Burada n ölçüm sayısı, y_i ölçülen karakteristik değer (yüze pürüzlülüğü), S/N birimi db (desibel) dir. Deney sonuçlarına ait S/N oranı değerleri Çizelge 3'de verilmekte olup, yüksek S/N oranları daima tercih edilmektedir.

3.2. Varyans Analizi (ANOVA) (Analysis of Variance (ANOVA))

ANOVA, deney tasarımıdaki işlem parametrelerinin kalite karakteristiği üzerindeki anlamlılığını belli bir güven seviyesinde ölçen istatistik tabanlı bir araçtır. Ortalamalara ve S/N oranlarına ait ANOVA'lar Çizelge 4 ve 5'de sırasıyla verilmektedir. Çizelgedeki kısaltmalara ait

açıklamalar bunlara ait son satırlarda belirtilmiştir. ANOVA'da anlamlı parametreler, çizelgenin beşinci sütununda ilgili işlem parametresi ya da etkileşime ait F değeri (ilgili parametreye ait varyansın toplam varyansa oranı) ile belirlenmektedir. İlgili parametreye ait F değeri belli anlamlılık seviyesindeki F çizelge değeri (F_{0,05}) ile karşılaştırılır; F_{0,05} belli anlamlılık seviyesinde (0,05 olarak belirlenmiştir) parametreye ait serbestlik derecesi ve hatanın serbestlik derecesi dikkate alınarak belirlenmektedir. Şayet F değeri büyükse parametre cevap üzerinde anlamlı kabul edilmektedir. Ortalamalar için yapılan ANOVA'da anlamlı parametre ortalama değeri etkilerken S/N için olanda ortalama civarındaki değişimi etkilemektedir [19]. Çizelgelerin son sütunu parametrelerin cevap üzerindeki yüzdelik dağılımını ifade etmektedir bir başka ifade ile anlamlılık oranı olarak da adlandırılabilir. Yüzdelik dağılımlar ilgili parametreye ait KT' değerinin toplam KT'ye oranının 100 ile çarpılmasıyla elde edilmektedir. Ortalamalar için gerçekleştirilen ANOVA'ya göre sadece uç yarıçapı ve talaş kırıcı tipi-uç yarıçapı parametrelerinin anlamlı olduğu gözlemlenmektedir. Bu parametrelerin yüze pürüzlülüğü üzerindeki anlamlılık oranları sırasıyla %60,38 ve %25,17 olarak elde edilmiştir. Diğer yandan, S/N için yapılan ANOVA'da kesme hızı, ve talaş kırıcı dışındaki tüm faktör ve etkileşimlerin anlamlı olduğu görülmektedir. Diğer ANOVA'yla benzer olarak, uç yarıçapı %67,29'luk oranla en dominant parametre olup, bunu anlamlılık sırasına göre talaş kırıcı tipi-uç yarıçapı (%27) ve kesme hızı-talaş kırıcı tipi (%3,97) etkileşimleri izlenmektedir.

Çizelge 4. Yüze pürüzlülüğü ortalamaları için ANOVA sonuçları (ANOVA results for surface roughness averages)

Kaynak	SD	KT	V	F	F _{0,05}	KT'	YD
Kesme hızı (A)	(1)	(0,00072)	-	Çekilmiş	-		
Talaş kırıcı tipi (B)	(1)	(0,08688)	-	Çekilmiş	-		
Uç yarıçapı (C)	1	1,00465	1,00465	30,24	6,61	0,971428	60,38
A*B	(1)	(0,06582)	-	Çekilmiş	-		
B*C	1	0,43820	0,43820	13,19	6,61	0,404978	25,17
Hata	5	0,16611	0,033222	-	-	0,232554	14,45
Toplam	7	1,60896				1,60896	100

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, V: Varyans, KT': Saf kareler toplamı ve YD: Yüzde dağılım

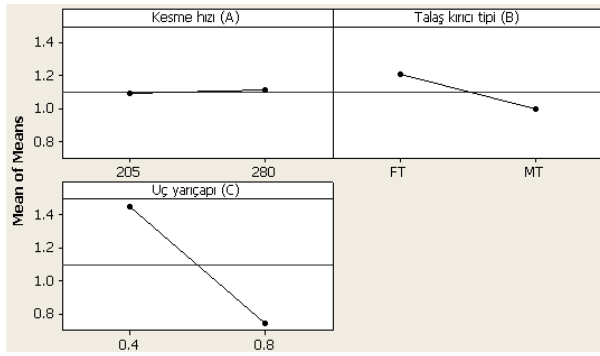
Çizelge 5. Yüzey pürüzlülüğü S/N oranları için ANOVA sonuçları (ANOVA results for S/N ratios of surface roughness)

Kaynak	SD	KT	V	F	F _{0,05}	KT'	YD
Kesme hızı (A)	(1)	(0,1652)	-	Çekilmiş	-	-	-
Talaş kırıcı tipi (B)	(1)	(0,6137)	-	Çekilmiş	-	-	-
Uç yarıçapı (C)	1	64,6759	64,6759	271,86	7,71	64,438	67,29
A*B	1	4,0439	4,0439	17,00	7,71	3,806	3,97
B*C	1	26,0891	26,0891	109,66	7,71	25,8512	27,00
Hata	4	0,9517	0,2379	-	-	1,6655	1,74
Toplam	7	95,7607	-	-	-	95,7607	100

SD: Serbestlik derecesi, KT: Kareler toplamı, V: Varyans, KT': Saf kareler toplamı ve YD: Yüzde dağılım

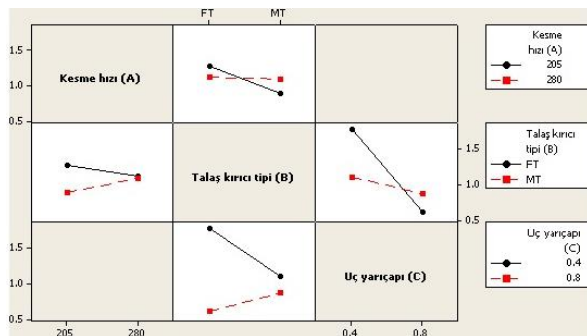
3.3. Optimum Yüzey Pürüzlülüğünün Belirlenmesi (Determination of Optimum Surface Roughness)

Optimum yüzey pürüzlülüğü, ortalamalar ve S/N değerlerine ait ANOVA'lar, faktörlere ait ana etkiler ve etkileşimler grafikleri (Şekil 7 ve 8) dikkate alınarak belirlenmiştir.



Şekil 7. İşlem parametrelerine ait ana etkiler grafiği (Main effects plots of process parameters)

Buna göre kesme hızının yataya yakın bir eğime sahip olduğu ve ANOVA'ya göre de anlamlı olmadığı görülmektedir. Buna karşın az da olsa birinci seviyede daha düşük pürüzlülük ortalamaları elde edilmiştir. Uç yarıçapı en anlamlı parametre olup, grafiğe göre, pürüzlülükle ters orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 8. İşlem parametrelerine ait etkileşim grafiği (Interactions plots of process parameters)

Optimum pürüzlülüğün hesaplanmasında ANOVA'daki anlamlı parametreler kullanılmaktadır. Buna göre uç yarıçapı ve talaş kırıcı tipi-uç yarıçapı parametreleri tahmini optimum pürüzlülüğün hesaplanmasında kullanılacaktır. Ana etkiler grafiğine göre uç yarıçapının ikinci (C=0,8 mm) etkileşim grafiğine göre de talaş kırıcının birinci ve uç yarıçapının ikinci seviyesine ait ortalamalar kullanılacaktır. Taguchi optimum pürüzlülüğü aşağıdaki eşitlikle tahmin etmektedir.

$$R_{at} = C_2 + B_1 C_2 - M \quad (2)$$

C₂ uç yarıçapının ikinci seviyesinde gerçekleşen deneylere ait ortalama pürüzlülük değeri. (2, 4, 6 ve 8 no'lu deneylere ait ortalamalar olup, C₂=0,743 μm). B₁C₂ Talaş kırıcının birinci, uç yarıçapının ikinci seviyesinde gerçekleştirilen deneylere ait ortalamalar (2 ve 6 no'lu deneylere ait pürüzlülük ortalamaları olup B₁C₂=0,613 μm) ve M'de tüm deneylere ait pürüzlülük ortalamalarını ifade etmekte ve 1,098 μm olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre Taguchi optimum yüzey pürüzlülüğünü 0,258 μm olarak tahmin etmektedir.

Bundan sonraki işlem, Taguchi'nin son uygulama basamağı olan tahmin edilen optimum değer için güven aralığının (CI) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmasıdır [20, 25].

$$CI = \left(F_{0,05}(1, df_e) \cdot V_e \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right] \right)^{1/2} \quad (3)$$

Eşitlikteki F_{0,05}(1,df_e), 0,05 anlamlılık seviyesinde 1'e ve hatanın serbestlik derecesine (5) göre çizelgelerden elde edilmekte olup, 6,61'dir. V_e hataya ait varyans değeridir ve 0,033222 olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4). R optimum seviyede gerçekleştirilen doğrulama deney sayısıdır ve 3 adet deney yapılmıştır. Son olarak n_{eff}, etkin tekrar sayısı olup, Eş. 4 vasıtası ile hesaplanmaktadır.

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (4)$$

Burada, N (8) toplam deney sayısını, V_t (2) de, ortalamasının hesaplandığı işlem parametrelerine ait toplam serbestlik derecesini ifade etmektedir. Buna göre,

n_{eff} , 2,667 olarak hesaplanmıştır. Bu veriler doğrultusunda, $CI=\pm 0,394$ olarak hesaplanmıştır. Yapılan 3 adet doğrulama deneyine ait ortalama sonucun $0 < R_{at} < 0,662$ aralığında yer alması gerekmektedir. Sonuç olarak optimum şartlarda ($A=205$ m/dak, $B=FT$, $C=0,8$ mm) gerçekleştirilen doğrulama deneylerinde $0,572$ μ m pürüzlülük ortalaması elde edilmiştir. Buna göre, önerilen metodun tahmini ile doğrulama deneyleri arasında yaklaşık %55'lik bir sapma gözlemlenmiştir. Buna karşın, Taguchi metodunda optimizasyonun geçerli olup olmaması, doğrulama deneylerine ait ortalamanın belirlenen CI'nın içinde olup olmamasıyla belirlenmektedir. Bu veriler ışığında, sistemin optimizasyonu yeterli doğrulukta gerçekleştirilmiştir.

4. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Deney planı esas alınarak gerçekleştirilen deneyler, maksimum üretimi amaçlayan, parametreler seçilip, parçaların kaba işlenmesinde kullanılmak üzere düşünülmüştür. Bir endüstriyel ürünün talaşlı imalatında kaba işleme üretimin oldukça fazla bir kısmını içermekte ve işleme süresini dolayısıyla maliyeti direkt olarak etkilemektedir. Buna karşın bitirme operasyonları sıklıkla tek paso olarak gerçekleştirilmektedir. Deney planına göre en düşük pürüzlülük ve pürüzlülük artışları 2, 6 ve 8 no'lu deneylerde elde edilmiştir. Buna göre; kesme hızının birinci ($A=205$ m/dak), talaş kırıcı tipinin birinci ($B=FT$), ve uç yarıçapının ikinci ($C=0,8$ mm) seviyesinde yapılan 2 no'lu deneyde $0,572$ μ m'lık pürüzlülük ve %56,11'lik pürüzlülük artışı; kesme hızının ikinci ($A=280$ m/dak) talaş kırıcı tipinin birinci ($B=FT$) ve uç yarıçapının ikinci seviyesinde ($C=0,8$ mm) yapılan 6 no'lu deneyde $0,576$ μ m'lık pürüzlülük ve %43,92'lik pürüzlülük artışı; ve kesme hızının ikinci ($A=280$ m/dak) talaş kırıcı tipinin ikinci ($B=MT$) ve uç yarıçapının ikinci seviyesinde ($C=0,8$ mm) 8 no'lu deneyde $0,938$ μ m'lık pürüzlülük ve %38,48'lik pürüzlülük artışı elde edilmiştir. Bu değerler oldukça yakındır. Aşağıda bu şartlarda gerçekleştirilen deneye ait 50 kat büyütülmeli dijital mikroskopla alınan uç görüntüleri verilmektedir (Şekil 8).

Şekil 8a ve b'de en düşük pürüzlülüklerin elde edildiği açıktır. Bu iki durumda da FT tipi talaş kırıcı kullanılmıştır. ANOVA değerleri dikkate alındığında Talaş kırıcı tipi-uç yarıçapı etkileşiminin anlamlı olduğu düşünüldüğünde $0,8$ mm'lik radius değerlerinin tamamında düşük pürüzlülük için "FT" talaş kırıcı tipinin tercih edilmesi gerekmektedir. Diğer yandan en düşük % pürüzlülük artışı dikkate alındığında "MT" tipi talaş kırıcının tercih edilmesi gerektiği açıkça görülmektedir. 2 ve 6 no'lu deneylerde ciddi krater aşınması ve plastik deformasyon başlangıcı gözlemlenirken 8 no'lu deneyde talaş kırıcı bölgesinde çok küçük bir aşınma başlangıcı elde edilmiştir. Ayrıca 2 no'lu şartla karşılaştırıldığında 280 m/dak'lık kesme hızının kullanılmasıyla daha düşük işleme zamanı elde edilebilecektir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Ortalamalar için gerçekleştirilen varyans analizine göre sadece uç yarıçapı ve talaş kırıcı tipi-uç yarıçapı faktör ve etkileşimlerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde anlamlı olduğu; uç yarıçapının %60,38'lik anlamlılık oranıyla en dominant etkiye sahip olduğu, bu parametreyi %25,17 ile adı geçen etkileşim izlemektedir.
- Faktörlere ait ana etkiler grafiğine göre, kesme hızının çok az bir eğime sahip olmasına ve anlamlı olmamasına rağmen yüzey pürüzlülüğü ile doğru orantılı değiştiği; uç yarıçapının artışı ile yüzey pürüzlülüğünde keskin bir düşüş olduğu ve talaş kırıcı tipinin ikinci seviyesi olan MT de daha düşük pürüzlülük ortalamaları elde edildiği gözlemlenmiştir.
- Faktörlere ait etkileşimler grafiğine göre, talaş kırıcı tipi-uç yarıçapı etkileşiminde, talaş kırıcı tipinin birinci ($B=FT$) ve uç yarıçapının ikinci seviyesinde ($C=0,8$ mm) gerçekleştirilen deneylerde, daha düşük pürüzlülük ortalamaları elde edilmiştir.
- Optimum pürüzlülük kesme hızının ve talaş kırıcı tipinin birinci ($A=205$ m/dak ve $B=FT$), ve uç yarıçapının ikinci seviyesinde ($C=0,8$ mm) $0,572$ μ m olarak elde edilmiştir.



Şekil 8. Düşük pürüzlülük ve pürüzlülük artışına sahip deneylere ait uç görüntüleri (Insert images of experiments with low roughness and roughness increase)

- Minimum takım aşınması, takım aşınma görüntüleri ve pürüzlülükteki % artış miktarlarına göre, kesme hızının, talaş kırıcı tipinin ve uç yarıçapının ikinci seviyelerinde (A=280 m/dak, B=MT ve C=0,8 mm) gözlemlenmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Maddi katkılarından dolayı Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine (Proje no: 2011-019) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sarma D.K., Dixit U.S., "A comparison of dry and air-cooled turning of grey cast iron with mixed oxide ceramic tool", *Journal of Materials Processing Technology*, 190: 160–172, (2007).
2. Özel T., Karpat, Y., "Predictive modeling of surface roughness and tool wear in hard turning using regression and neural networks", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45: 467–479, (2005).
3. Risbood K.A., Dixit U.S., Sahasrabudhe A.D., "Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process". *Journal of Materials Processing Technology*, 132: 203–214, (2003).
4. Karayel D., "Prediction and control of surface roughness in CNC lathe using artificial neural network", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 3125-3137, (2009).
5. Abburi N.R., Dixit U.S., "A knowledge-based system for the prediction of surface roughness in turning process". *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22: 363–372, (2006).
6. Al-Ahmari A.M.A., "Predictive machinability models for a selected hard material in turning operations", *Journal of Materials Processing Technology*, 190: 305–311, (2007).
7. Ho, S.Y., Lee K.C., Chen S.S., Ho S.J., "Accurate modeling and prediction of surface roughness by computer vision in turning operations using an adaptive neuro-fuzzy inference system". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42: 1441–1446, (2002).
8. Davim J.P., Gaitonde V.N., Karnik S.R., "Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ANN models". *Journal of Materials Processing Technology*, 205: 16–23, (2008).
9. Tzeng, C.J., Lin, Y.H., Yang Y.K., "Optimization of turning operations with multiple performance characteristics using the Taguchi method and Grey relational analysis", *Journal of Materials Processing Technology*, 209: 2753-2759, (2009).
10. Manna A., Salodkar S., "Optimization of machining conditions for effective turning of E0300 alloy steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 203: 147-153, (2008).
11. Kopac J., Bahor M., Sokovic M., "Optimal machining parameters for achieving the desired surface roughness in fine turning of cold pre-formed steel workpieces", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42: 707-716, (2002).
12. Dawim J.P., "A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments", *Journal of Materials Processing Technology*, 116: 305-308, (2001).
13. Dawim J.P., Figueira L., "Machinability evaluation in hard turning of cold work tool steel (D2) with ceramic tools using statistical techniques", *Materials and Design*, 28: 1186-1191, (2007).
14. Nalbant M., Gökkaya H., and Sur G., "Application of Taguchi method in the optimization of cutting parameters for surface roughness in turning", *Materials and Design*, 28: 1379-1385, (2007).
15. Yang W.H., Tarn Y.S., "Design optimization of cutting parameters for turning operations based on the Taguchi method", *Journal of Materials Processing Technology*, 84: 122-129 (1998).
16. Aslan E., Camuşcu N., Birgören B., "Design optimization of cutting parameters when turning hardened AISI 4140 steel (63 HRC) with Al₂O₃+TiCN mixed ceramic tool". *Materials and Design*, 28: 1618-1622, (2007).
17. Pinar A.M., "Modelling of Surface Roughness Performance of Coated Cemented Carbide Groove Cutting Tool Via Artificial Neural Networks", *Gazi University Journal of Science*, 24(4): 901-910, (2011).
18. Pinar A.M., Fırat K., Pinar A.F., Filiz, S., "Kanal Torna Kaleminin Yüzey Pürüzlülük Performansının Optimizasyonu", *3. Ulusal Talaş İmalat Sempozyumu*, 04-05 Ekim, Ankara, Türkiye, 240-250, (2012).
19. Pinar A.M., "Optimization of process parameters with minimum surface roughness in the pocket machining of AA5083 aluminium alloy via Taguchi method", *The Arabian Journal for Science and Engineering B: Engineering*, 38 (3): 705-714, (2013).
20. Çavdar U., Pinar A.M., Atik E., Ünlü B.S., "İndüksiyonla sinterlenen demir esaslı toz metal parçaların korozyon davranışının optimizasyonu". *13th International Materials Symposium (IMSP'2010)*, Pamukkale University–Denizli–Turkey. 13-15th October, 715-723, (2010).
21. Pinar A.M., ve GÜLLÜ A., "Sayısal denetimli hidrolik pozisyonlama sisteminin Taguchi metodu ile optimizasyonu", *Journal of Faculty of Engineering and Architecture Gazi University*, 25 (1): 93-100, (2010).
22. Pinar A.M., "AA 6013 alüminyum alaşımının frezelenmesinde ortalama ve toplam yüzey pürüzlülüğüne göre kesme parametreleri etkilerinin incelenmesi". *e-Journal of New World Sciences Academy*, 5(1): 15-27, (2010).
23. Phadke S.M., "Quality engineering using robust design", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs. New Jersey, (1989).
24. Ünal R., Dean E.B., "Taguchi Approach to design optimization for quality and cost: An Overview", *13th Annual Conference of the International Society of Parametric Estimators*, 1-10, (1991).
25. Ross P.J., "Taguchi technique for quality engineering". *McGraw-Hill*, New York. (1988).

Trigonometrik Splin Kullanarak Robotlar İçin Optimal Yörünge Elde Edilmesi

Serdar KÜÇÜK

Kocaeli Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Biyomedikal Mühendisliği Bölümü, Umuttepe Kampüsü, 41380, Kocaeli, Türkiye
(Geliş / Received : 13.02.2016 ; Kabul / Accepted : 02.05.2016)

ÖZ

Bu makalede parçacık sürü optimizasyonu algoritması kullanarak endüstriyel robotlar için çok önemli olan yörünge optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yörünge algoritması olarak trigonometrik splin kullanılmıştır. Trigonometrik splinler yüksek dereceli polinomlar ve kübik splinler gibi yörünge algoritmalarıyla karşılaştırıldığında daha yumuşak bir yörünge üretilmekte ve sadece dördüncü derecede sürekli jerk sağlayabilmektedirler. Düşük derecede sürekli jerk eklemlerdeki titreşimi minimize ederek mekanizmanın ömrünü artırmakta ve ayrıca yörünge en az hatayla takip edebilmesini sağlamaktadır. Optimizasyon algoritması olarak kolay uygulanabilmesi ve başarıyla test edilmiş optimizasyon performansından dolayı Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritması kullanılmıştır. Bu makalede önerilen yöntemi test etmek için bir örnek yörünge PUMA 560 robotu için çalıştırılıp optimizasyon sonuçları grafikler halinde verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Trigonometrik splinler, yörünge optimizasyonu, parçacık sürü optimizasyonu algoritması, endüstriyel robotlar

Optimal Trajectory Derivation for Robotic Manipulators by Using Trigonometric Splines

ABSTRACT

In this paper, particle swarm optimization algorithm is used for trajectory optimization of industrial robotic manipulators. Trigonometric splines are used as trajectory optimization algorithm. Trigonometric splines can provide smooth trajectory and continuous jerk at only third derivative of position compared with higher order polynomials and cubic splines. Minimum continuous jerk reduces vibration at the joints that extends mechanism lifespan and provides trajectory tracking with minimal error. Particle Swarm Optimization algorithm (PSO) is used as optimization algorithm due to its easy implementation and successful optimization performance. A sample trajectory is performed for PUMA 560 robot in order to test the proposed method and optimization results are given as graphs.

Keywords: Trigonometric splines, trajectory optimization, particle swarm optimization algorithm, industrial robots

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Robotlar temelde iki şekilde yörünge hareketi gerçekleştirir. Birincisi bir nesneyi bir yerden alıp başka bir yere koymaktır. Bu hareket tipinde eğer engel yoksa robot nesneyi alıp koyma işlemini çalışma uzayı içerisinde herhangi bir yörüngeyi serbestçe izleyerek tamamlayabilir. İkincisinde ise robot iki nokta arasında önceden belirlenen noktalardan geçerek tamamlar [1]. Bu yörünge tipi ara nokta koşullu yörünge olarak adlandırılır. Ara nokta koşullu yörünge işlemi özellikle kaynak, kesme ameliyat gibi sürekli hareketin ihtiyaç duyulduğu yerlerde kullanılır.

Bir robotun en iyi performansla bir görevi yerine getirebilmesi için uygun bir yörünge oluşturulması son derece önemlidir [2]. Ayrıca oluşturulan yörüngeyi uç işlevcinin yüksek doğrulukla izleyebilmesi için yörünge algoritmasının yumuşak hareket sağlayacak şekilde oluşturulması gerekir. Endüstride birçok yörünge

algoritması çalışma ortamındaki engeller de göz önünde bulundurularak öncelikle çevrim dışı oluşturulup daha sonra oluşturulan bu yörünge robota çevrim içi olacak şekilde icra ettirilir. Çevrim dışı yörünge oluşturma işlemi Kartezyen ve eklem uzayında olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Kartezyen uzayda yörünge oluşturulurken her bir örnekleme frekansı için öncelikle eklem uzayındaki veriler ters Jacobian matris kullanılarak Kartezyen uzayındaki verilere dönüştürülür. Bu dönüşüm her bir örnekleme frekansı için gerçekleştirildiğinden son derece ağır işlem yükünün çok kısa bir zamanda tamamlanmasını gerektirir. Ayrıca ters Jacobian alınırken hatalar oluşacağından robotun yörüngeyi hatalı takip etmesine neden olur. Bahsi geçen bu iki sebepten dolayı Kartezyen uzayda yörünge oluşturulması robot araştırmacıları tarafından pek tercih edilmemiştir [3]. Eklem uzayında yörünge oluşturulurken, Kartezyen konum ve yönelim bilgisi öncelikle ters kinematik vasıtasıyla eklem konum bilgisine dönüştürülür. Eklem uzayında yörünge oluşturma işleminde sadece kinematik kısıtlamalar göz önünde bulundurulduğundan bu yöntemin işlem yükü Kartezyen

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: skucuk@kocaeli.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 499-505

uzayda yörünge oluşturma yöntemine göre daha az olup bilgisayar ortamında son derece kısa bir zaman diliminde gerçekleştirilir. Bu durum eklem uzayında yörünge oluşturma yönteminin diğer yöntemlere göre üstünlüğü olduğundan robot camiası tarafından daha fazla tercih edilmektedir [3].

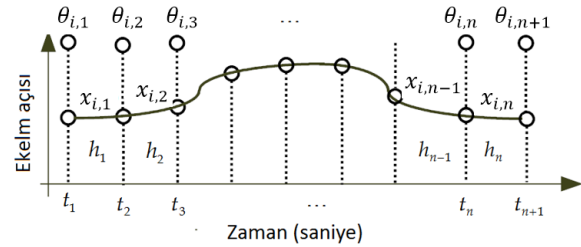
Eklem uzayında yörünge oluşturulurken, Kartezyen uzayda tasarlanan yörünge üzerinde bir takım ara noktalar (via points) belirlenir. Daha sonra bu ara noktalar ters kinematik vasıtasıyla eklem açılarına dönüştürülür. Daha sonra art arda gelen her iki eklem açısı arasında kalan bölge her hangi bir yörünge algoritması kullanılarak doldurulur. Literatürde, robot yörüngelerinin oluşturmada yüksek dereceli polinomlar [4], trigonometrik [5], B [6] ve kübik [7] splinler gibi yörünge oluşturma algoritmaları önerilmiştir. Bir robot yörünge algoritması, şu dört koşulu sağlamalıdır: 1) düşük aşım, düşük osilasyon ve düşük jerk, 2) düşük titreşim, 3) sürekli hız, ivme ve jerk, 4) yörünge başlangıç ve bitişinde sıfır hız, ivme ve jerk [5]. Yüksek dereceli polinomlar üç ve dördüncü koşulu sağlamalarına rağmen, polinomun derecesi yükseldikçe aşım ve osilasyon arttığından [5,7] bir ve ikinci koşulda son derece kötü bir performans sergilemektedir. Kübik splinler sadece hız ve ivmede süreklilik göstermektedirler [3,7]. Yörünge başlangıç ve bitişlerinde jerk sıfır olmamaktadır [3,7]. Üçüncü ve dördüncü dereceden düşük dereceli B-splinler sadece hız ve ivmede süreklilik gösterirken ancak beşinci dereceden bir B-splin hız ivme ve jerkte süreklilik göstermektedir [8]. Trigonometrik splinler ise sadece konumun üçüncü türevinin alınmasıyla dördüncü derecede sürekli hız, ivme ve jerk sağlayabilmektedir [5]. Ayrıca yörünge başlangıç ve bitiş noktalarında hız, ivme ve jerkün sıfır yapılmasına ve jerk'ün düşürülmesine de izin vermektedir. Jerk'ün düşürülmesi eklem konum hatalarını azaltır ve robotun, osilasyonu küçültür ve titremeyi azaltır ve robotun yörüngeyi yumuşak bir şekilde en az hatayla takip edebilmesini sağlar [5, 9, 10]. Bu çalışmada yörünge algoritması olarak en düşük derecede (dördüncü) hız, ivme ve jerk'te süreklilik sağlanmasından dolayı trigonometrik splinler kullanılmıştır.

Günümüze kadar yukarıdaki dört koşulu sağlayan en-iyi zamanlı yumuşak bir yörünge elde edebilmek için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir [6, 7, 11, 12, 13, 14]. Bu çalışmalarda, en-iyi zamanlı yumuşak yörünge elde edebilmek için interval analysis [6], analytical optimization approach [12], Sequential Quadratik Programlama (SQP) [7, 13, 14] ve konvex optimizasyon teknikleri [11] gibi geleneksel sayısal optimizasyon algoritmaları kullanılmıştır. Bu algoritmalar amaç fonksiyonun birinci ve ikinci türevlerini kullanarak doğrusallaştırma kullandıklarından genellikle yerel minimum değerine yakınsamaktadır [15]. Bu problem geleneksel sayısal optimizasyon algoritmalarının en önemli eksikliğidir. Bu makalede ise optimizasyon algoritması olarak PSO algoritması tercih edilmiştir. PSO algoritmasının yukarıda bahsedilen geleneksel sayısal optimizasyon algoritmalarına ve genetik algoritma gibi

evrimsel algoritmalara göre bariz üstünlüğü vardır [16, 17]. Bu üstünlükler şöyle sıralanabilir: 1) Çok boyutlu doğrusal olmayan ve süreksiz problem için optimize edilmiş veya buna yakın bir sonucu çok kısa bir süre içerisinde verir, 2) Hafızaya sahiptir. En son iterasyondan elde edilen iyi sonuç hafızada tutulur, 3) Sonuç başlangıç nüfusuna bağlı değildir, 4) Probleme kolayca uygulanır. Bu makalede PSO algoritması kullanılarak trigonometrik splin tabanlı optimize edilmiş robot yörüngesini test etmek için PUMA 560 robotu üzerinde bir örnek uygulama gerçekleştirilmiştir.

2. TRİGONOMETRİK SPLİNLER (TRIGONOMETRIC SPLINES)

Bir trigonometrik splin kullanarak ara nokta koşullu bir robot yörüngesi şu şekilde meydana getirilir. Öncelikle Kartezyen uzayda yörünge başlangıç ve bitiş noktaları arasında birçok ara nokta yerleştirilir. Art arda gelen her iki Kartezyen nokta arasında kalan bölgeye segment denir. Eğer bir yörünge $n + 1$ adet Kartezyen noktadan oluşuyorsa n tane segment içerir. Bu Kartezyen noktalardan daha sonra ters kinematik [18] kullanılarak her bir eklem değişkeni için konum bilgisi elde edilir. Şekil 1'de n tane segmentden oluşan bir trigonometrik splin tabanlı yörünge görülmektedir. Şekilde i, n, t, h ve x sarasıyla eklem değişkeni, segment sayısını, zaman, segment süresi ve her hangi bir eklem değişkeninin art arda gelen iki konumu arasında yerleştirilecek trigonometrik splini göstermektedir.



Şekil 1. Trigonometrik splin kullanarak robot yörüngesinin oluşturulması (Derivation of robotic trajectory using trigonometric spline)

Trigonometrik splinler ilk olarak 1964 yılında Schoenberg[19] tarafından ortaya atılmıştır. Daha sonra Koch[20], Lyche ve Winther[21] gibi yazarlar trigonometrik splinleri $t_i \leq t \leq t_{i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, n + 1$) aralığında aşağıdaki gibi bir periyodik fonksiyon formunda yazmışlardır.

$$x_i(t) = a_{i,0} + \sum_{k=1}^{m-1} (a_{i,k} \cos kt + b_{i,k} \sin kt) + a_{i,m} \cos m(-\gamma_i) \quad (1)$$

Bu fonksiyonda $\gamma_i = \sum_{j=0}^{2m-1} \left(\frac{\tau_{ij}}{2m} \right)$ olarak tanımlanmıştır. Bu ifadede τ_{ij} ifadesi her bir segmentteki koşulları göstermektedir. Yukarıdaki γ_i ifadesinden her bir segment için $2m$ tane katsayı olduğu ifade edilebilir. Konum, hız, ivme ve jerk ifadelerinin tamamının sürekli

olabilmesi için dördüncü dereceden bir trigonometrik polinoma ihtiyaç duyulur. Her bir segment için dördüncü dereceden bir trigonometrik polinom ve bunlara ait sekiz ($2m = 2 \cdot 4 = 8$) tane katsayı çözülür. Daha sonra her bir trigonometrik polinom art arda eklenerek tasarlanan yörüngeye ait trigonometrik splin oluşturulur. Bahsi geçen sekiz tane katsayıyı çözmek için 8×8 boyutlu bir matrisin tersinin alınması gereklidir. Bu makalede $t_i = 0$ ve $t_{i+1} = \pi/4$ ($i = 1, 2, \dots, n+1$) zaman aralığı kullanılmıştır. Dördüncü dereceden bir trigonometrik polinom kullanıldığından hem $t = 0$ hem de $t = \pi/4$ için dört adet koşul bulunur. Bu durumda her bir segment için $\tau_{i0} = \tau_{i1} = \tau_{i2} = \tau_{i3} = 0$ ve $\tau_{i4} = \tau_{i5} = \tau_{i6} = \tau_{i7} = \pi/4$ elde edilir. Sonuç olarak her bir segment için $\gamma_i = \pi/8$ elde edilir. Bu durumda denlem 1'deki ifade aşağıdaki gibi olur.

$$x_{i,n}(t) = a_{i,0} + \sum_{k=1}^3 (a_{i,k} \cos kt + b_{i,k} \sin kt) + a_{i,m} \cos m t \quad (2)$$

Denklem 2'yi $t \in [t_i, t_{i+1}]$ aralığında 8 adet koşulu göz önünde bulundurarak yazalım. İlk iki koşul segment başı ve segment sonundaki konum değerlerini içerir.

$$x_{i,1}(t) = a_{i,0} + a_{i,1}ct_i + b_{i,1}st_i + a_{i,2}c2t_i + b_{i,2}s2t_i + a_{i,3}c3t_i + b_{i,3}s3t_i + a_{i,4}c4t_i \quad (3)$$

$$x_{i,1}(t+1) = a_{i,0} + a_{i,1}ct_{i+1} + b_{i,1}st_{i+1} + a_{i,2}c2t_{i+1} + b_{i,2}s2t_{i+1} + a_{i,3}c3t_{i+1} + b_{i,3}s3t_{i+1} + a_{i,4}c4t_{i+1} \quad (4)$$

Denklemde ct_i ve st_i sırasıyla $\cos t_i$ ve $\sin t_i$ anlamına gelmektedir. Diğer altı kısıt ise denklem 2 ve 3'ün birinci türevinden elde edilen segment başı ve segment sonundaki hız, ikinci türevinden elde edilen segment başı ve segment sonundaki ivme ve son olarak üçüncü türevinden elde edilen segment başı ve segment sonundaki jerk ifadelerinden oluşmaktadır. Sekiz denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S_{i,1}^T = M_{i,1} K_{i,1}^T \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

Denklemde

$$S_{i,1} = [x_{i,1}(t) \quad x_{i,1}(t+1) \quad x'_{i,1}(t) \quad x'_{i,1}(t+1) + 1 \quad x''_{i,1}(t) \quad x''_{i,1}(t+1) + 1 \quad x'''_{i,1}(t) \quad x'''_{i,1}(t+1) + 1] \quad (6)$$

$$K_{i,1} = [a_{i,0} \quad a_{i,1} \quad b_{i,1} \quad a_{i,2} \quad b_{i,2} \quad a_{i,3} \quad b_{i,3} \quad a_{i,4}] \quad (7)$$

$$M_{i,1} = \begin{bmatrix} 1 & ct_i & st_i & c2t_i & s2t_i & c3t_i & s3t_i & c4t_i \\ 1 & ct_{i+1} & st_{i+1} & c2t_{i+1} & s2t_{i+1} & c3t_{i+1} & s3t_{i+1} & c4t_{i+1} \\ 0 & -st_i & ct_i & -2s2t_i & 2c2t_i & -3s3t_i & 3c3t_i & -4s4t_i \\ 0 & -st_{i+1} & ct_{i+1} & -2s2t_{i+1} & 2c2t_{i+1} & -3s3t_{i+1} & 3c3t_{i+1} & -4s4t_{i+1} \\ 0 & -ct_i & -st_i & -4c2t_i & -4s2t_i & -9c3t_i & -9s3t_i & -16c4t_i \\ 0 & -ct_{i+1} & -st_{i+1} & -4c2t_{i+1} & -4s2t_{i+1} & -9c3t_{i+1} & -9s3t_{i+1} & -16c4t_{i+1} \\ 0 & st_i & -ct_i & 8s2t_i & -8c2t_i & 27s3t_i & -27c3t_i & 64s4t_i \\ 0 & st_{i+1} & -ct_{i+1} & 8s2t_{i+1} & -8c2t_{i+1} & 27s3t_{i+1} & -27c3t_{i+1} & 64s4t_{i+1} \end{bmatrix} \quad (8)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem 5'den faydalanarak katsayı vektörü aşağıdaki gibi bulunur.

$$K_{i,1}^T = M_{i,1}^{-1} S_{i,1}^T \quad (9)$$

Trigonometrik polinom her bir segment için $t \in [t_i, t_{i+1}] = [0, \frac{\pi}{4}]$ kapalı aralığında tanımlandığından tasarlanan trigonometrik splin $n \frac{\pi}{4}$ tane zaman aralığının toplamına eşittir. Bu aşamada denklem 2 ile verilen trigonometrik splinin zamanla ölçeklendirilmesi gerekmektedir. Bu ölçekleme aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\theta_{i,1}(t) = x_{i,1}(n \frac{\pi t}{4T}) \quad (10)$$

Denklemde t segment içinde ki anlık zamanı, T ise segmentin süresini göstermektedir. Denklem 10'da verilen ifadenin bir, iki ve üçüncü türevleri aşağıdaki gibi bulunur.

$$\begin{aligned} \theta'_{i,1}(t) &= \left(\frac{n\pi}{4T}\right) x_{i,1}\left(\frac{n\pi t}{4T}\right), \\ \theta''_{i,1}(t) &= \left(\frac{n\pi}{4T}\right)^2 x_{i,1}\left(\frac{n\pi t}{4T}\right) \quad \text{ve} \quad \theta'''_{i,1}(t) \\ &= \left(\frac{n\pi}{4T}\right)^3 x_{i,1}\left(\frac{n\pi t}{4T}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

3. PARÇACIK SÜRÜ OPTİMİZASYONU (PARTICLE SWARM OPTIMIZATION)

1995 yılında kuş ve balıkların davranışlarından esinlenilerek geliştirilen parçacık sürü optimizasyon algoritması [22] sayısal optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılan evrimsel bir optimizasyon tekniğidir. PSO algoritması bir çok mühendislik alanına uygulanmış son derece başarılı sonuçlar vermiş bir algoritmadır [23-26]. PSO algoritması geleneksel optimizasyon tekniklerine ve diğer evrimsel algoritmalara göre belirgin üstünlüğü vardır. Bunlar şöyle sıralanabilir: 1)Optimizasyon algoritması olarak problemlere kolay uygulanabilmesi, 2)Çok boyutlu doğrusal olmayan ve süreksiz problemlerin için optimize edilmiş veya buna yakın bir sonucu çok kısa bir süre içerisinde verir, 3)Hafızaya sahiptir. En son iterasyondan elde edilen iyi sonuç hafızada tutulur, 4)Sonuç başlangıç nüfusuna bağlı değildir, PSO algoritmasıyla ilgili detaylı bilgi referans [25]'te bulunabilir.

4. TRİGONOMETRİK SPLİNE OPTİMİZASYONU (OPTIMIZATION OF TRIGONOMETRIC SPLINE)

Bu bölümde parçacık sürü optimizasyon algoritması kullanılarak trigonometrik splin tabanlı yörünge optimizasyon algoritmasının formülizasyonu açıklanmaktadır. Literatürde robot yörüngelerinin optimizasyonu ile ilgili tanımlanan hemen hemen bütün teknikler temel de iki kriterin optimize edilmesini amaçlamıştır [27]. Bu kriterler, 1)yörünge minimum sürede takip edilmesi, ve 2)yörünge boyunca minimum jerk'in elde edilmesidir. Bu makalede PSO algoritması ile her bir segment süresini ve jerkü minimize ederek toplam yörünge süresi ve toplam jerkü minimize etmeyi amaçlamaktadır. Yörünge

optimizasyonu gerçekleştirilirken eklem hızları, ivmeleri ve jerk gibi kinematik kısıtlamalar göz önünde bulundurulmuştur. Sonuç olarak yörünge optimizasyonunda kullanılacak amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi verilir.

$$\min \left(\sum_{i=1}^n h_i + \sum_{j=1}^m \int_0^{t_f} (\ddot{\theta}_j(t))^2 dt \right) \quad (12)$$

kısıtlamalar

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i^{\min} &\leq \dot{\theta}_i \leq \dot{\theta}_i^{\max} & i = 1, 2, \dots, m \\ \ddot{\theta}_i^{\min} &\leq \ddot{\theta}_i \leq \ddot{\theta}_i^{\max} & i = 1, 2, \dots, m \\ \ddot{\theta}_i^{\min} &\leq \ddot{\theta}_i \leq \ddot{\theta}_i^{\max} & i = 1, 2, \dots, m \\ h_i^{\min} &\leq h_i \leq h_i^{\max} & i = 1, 2, \dots, n \end{aligned}$$

Denklemler m, n, h_i and t_f sırasıyla robottaki eklem sayısını, yörünge üzerindeki ara nokta sayısını, i . segment zamanı, toplam yörünge süresini göstermektedir. $\dot{\theta}_i, \ddot{\theta}_i$ and $\ddot{\theta}_i$ sırasıyla hız, ivme ve jerk ifadelerini göstermektedir. Hız, ivme ve jerk belli bir minimum ($\dot{\theta}_i^{\min}, \ddot{\theta}_i^{\min}$ and $\ddot{\theta}_i^{\min}$) ve maximum ($\dot{\theta}_i^{\max}, \ddot{\theta}_i^{\max}$ and $\ddot{\theta}_i^{\max}$) aralıkta olmalıdır.

5. ÖRNEK UYGULAMA (CASE STUDY)

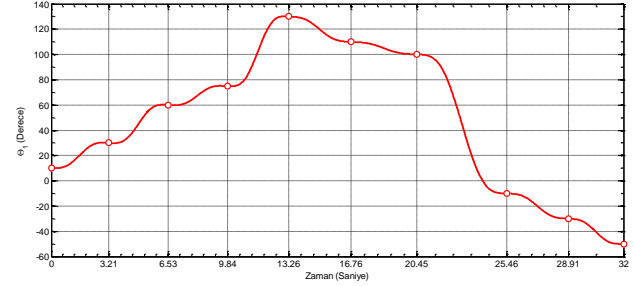
Bu çalışmada PSO algoritması kullanarak trigonometrik splin tabanlı yörünge optimizasyonu yöntemini test etmek için PUMA 560 robotunun izlediği yörünge tanımlanmıştır. Bu yörünge toplam 10 ara noktadan ve dolayısıyla 9 tane segmentten oluşmaktadır. Bu ara noktaların eklem uzayındaki karşılıkları Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. Robotun izleyeceği eklem uzayındaki yörüngeye ait eklem açıları, "derece" (Joint angles for trajectory tracking in the joints space, "in degrees")

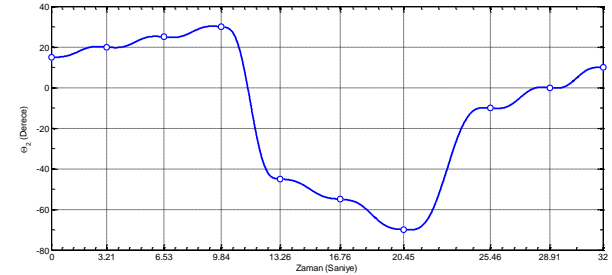
Ara noktalar	Eklem					
	1	2	3	4	5	6
1	10	15	45	5	10	6
2	30	20	110	12	20	22
3	60	25	180	20	30	40
4	75	30	200	60	-40	80
5	130	-45	120	110	-60	70
6	110	-55	15	20	10	-10
7	100	-70	-10	60	50	10
8	-10	-10	100	-100	-40	30
9	-30	0	75	-65	-15	25
10	-50	10	50	-30	10	20

Denklemler 12 kullanılarak optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon gerçekleştirilirken her bir segment $\frac{\pi}{4}$ aralıklarına ayrılıp işlem yapıldığından $n = 1$ alınmıştır. Ara noktalarındaki maksimum ve minimum hız, ivme ve jerk değerleri sırasıyla $[-3, 3], [-2, 2]$ ve $[-1, 1]$ derece seçilmiştir. Maksimum ve minimum segment zaman aralığı ise $[3, 6]$ saniye seçilmiştir. Optimizasyon sonucunda segment zamanları $s_1=3.21, s_2=3.32, s_3=3.31, s_4=3.42, s_5=3.5, s_6=3.69, s_7=5.01, s_8=3.45$ ve $s_9=3.09$ olarak elde edilmiştir. Her bir eklem için optimize edilmiş konum grafikleri Şekil 2'de görülmektedir. Şekil 2'de ki grafiklerden ard arda gelen ara noktalarda süreklilik elde edildiğinden ve herhangi bir atlama

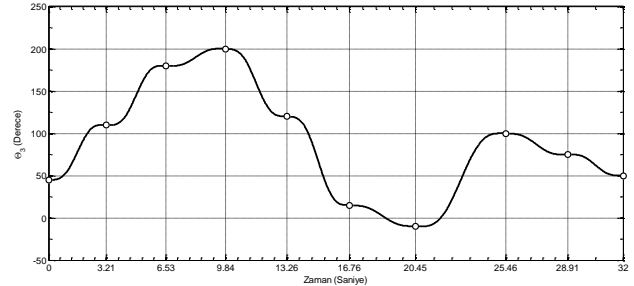
olmadığından gayet yumuşak bir yörünge elde edildiği görülmektedir.



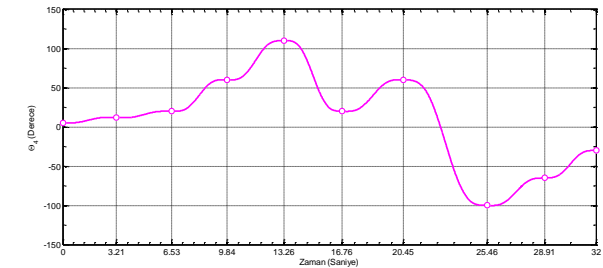
Şekil 2a. Birinci eklem için konum grafiği (Position profile of first joint)



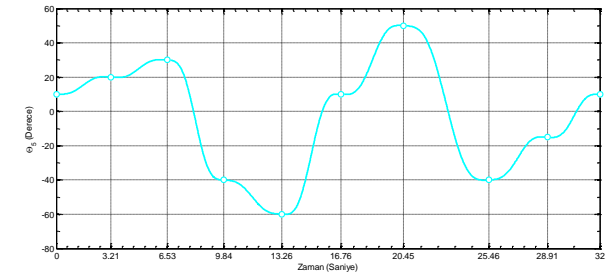
Şekil 2b. İkinci eklem için konum grafiği (Position profile of second joint)



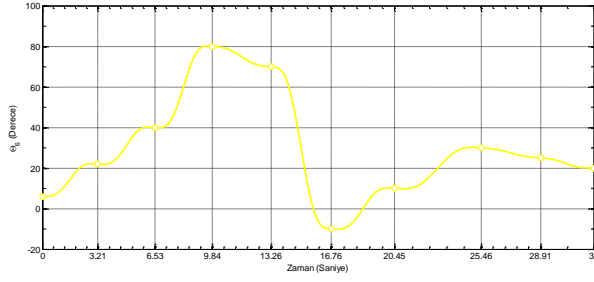
Şekil 2c. Üçüncü eklem için konum grafiği (Position profile of third joint)



Şekil 2d. Dördüncü eklem için konum grafiği (Position profile of fourth joint)

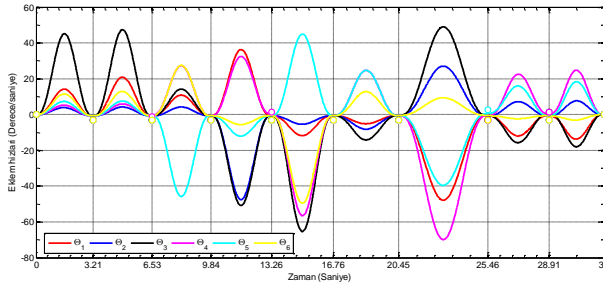


Şekil 2e. Beşinci eklem için konum grafiği (Position profile of fifth joint)

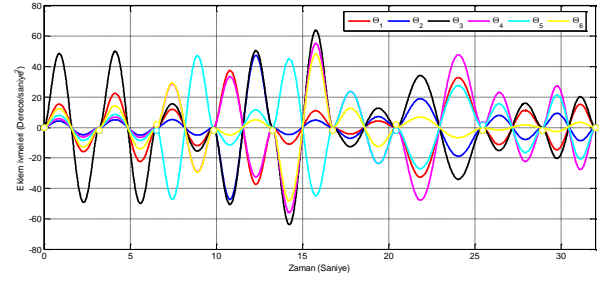


Şekil 2f. Altıncı ekleme ait konum grafiği (Position profile of sixth joint)

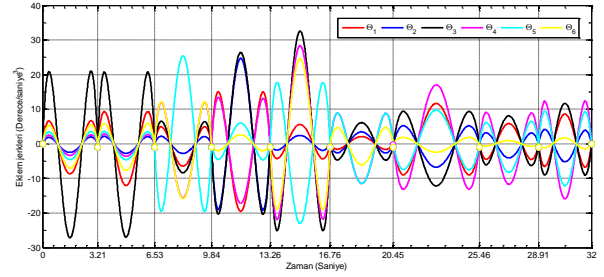
Şekil 3'te eklemlere ait hız, ivme ve jerk grafikleri görülmektedir. Şekil 3'de ki grafiklerden elde edilen hız, ivme ve jerk grafiklerinin sürekli ve gayet yumuşak olduğu görülmektedir. Ayrıca sadece dördüncü dereceden bir trigonometrik fonksiyonla başlangıç ve bitiş jerkü kontrol edilmiştir. Yörünge sonlarında sıfır hız, ivme ve jerk elde edilmiştir. Bu durum trigonometrik splinlerin diğer splinlere göre üstünlüğüdür. Böylece giriş bölümünde bahsedilen bir robot yörünge algoritmasının sahip olması gereken özelliklere trigonometrik splin kullanarak ulaşılmıştır. Trigonometrik splinlerin bütün bu olumlu özelliklerinin yanısıra bu çalışmada trigonometrik splinler için daha önceki çalışmalarda belirtilmeyen bir eksiklik tespit edilmiştir. Şekil 3'teki grafiklerde ara noktalarındaki hız, ivme ve jerk değerleri amaçlanan aralıklarda çıkmasına rağmen, ara noktalar arasındaki bulunan segment hız, ivme ve jerk değerleri ara noktalarındaki değerlere göre yüksek çıkmıştır. Bu durum trigonometrik splinlerin diğer yöntemlere göre en belirgin eksikliğini göstermektedir.



Şekil 3a. Eklemlere ait hız grafiği (Velocity profiles of joints)



Şekil 3b. Eklemlere ait ivme grafiği (Acceleration profiles of joints)



Şekil 3c. Eklemlere ait jerk grafiği (Jerk profiles of joints)

Trigonometrik splinler robotu hızlı bir şekilde başlangıç noktasından hedef noktaya götürebilmek için segment içerisinde yüksek ama ara noktaya yaklaşınca düşük bir hız üretmektedir. Buda robotun ara nokta sayısı kadar hızlanıp yavaşlaması anlamına gelmektedir. Bu durum robotun eyleyicisinin ömrünün kısalmasına neden olabilir. Robotu bu olumsuz eksiklikten kurtarmak için trigonometrik splinleri özellikle mobil robotlar, bacaklı robotlar (legged robots), ve medikal robotlar gibi düşük hız gerektiren uygulamalarda kullanmak uygun olacaktır.

Çizelge 2'de Şekil 3'teki eklemlere ait hız, ivme ve jerk grafiklerinden elde edilen her bir ekleme ait pozitif ve negatif yönde maksimum hız, ivme ve jerk değerleri görülmektedir. Çizelge 3'te ise Çizelge 2'de elde edilen hız değerlerinin rpm karşılıkları görülmektedir. Günümüzde endüstride üretilen dc veya ac servo motorlar Çizelge 3'deki rpm değerlerini sağlayabilecek şekilde üretilmektedir. Buda pratik uygulamada yörünge hatası oluşmasını engeller. Sonuçta elde edilen sonuçların pratik uygulamalar için uygun olduğu kolayca söylenebilir.

Çizelge 2. Eklemlere ait pozitif ve negatif yönde maksimum hız, ivme ve jerk değerleri (maximum & minimum velocity, acceleration and jerk values of joints)

Eklem	Hız(derece/saniye)		İvme (derece/saniye ²)		Jerk (derece/saniye ³)	
	+max	-max	+max	-max	+max	-max
1	36.3289	-47.8901	37.4089	-37.4084	15.0611	-19.5149
2	27.0034	-47.5688	47.3688	-47.3664	24.7117	-19.0644
3	49.0258	-65.4036	63.9036	-63.9020	32.5784	-27.1900
4	32.4810	-69.8894	55.3133	-55.9722	27.8177	-21.4548
5	44.9543	-45.8133	47.0881	-47.0857	25.3788	-23.0198
6	27.3817	-49.6353	48.3404	-48.3404	24.6971	-19.0435

Çizelge 3. Eklemlere ait hızların rpm karşılıkları (The rpm values of joint velocities)

EKLEM	Hız(rpm)	
	+max	-max
1	6.055	-7.982
2	4.501	-7.928
3	8.171	-10.901
4	5.414	-11.648
5	7.492	-7.636
6	4.564	-8.273

6. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu makalede trigonometrik splin kullanarak endüstriyel robotlar için optimal yörünge elde edilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak PSO algoritması kullanılmıştır. Makalede önerilen yöntemi test etmek için bir örnek yörünge PUMA 560 robotu için çalıştırılıp optimizasyon sonuçları grafikler halinde verilmiştir. PSO algoritmasıyla optimize edilen trigonometrik splin tabanlı yörünge gayet yumuşak bir şekilde başlayıp bittiği grafiklerle gösterilmiştir. Sadece dördüncü dereceden bir trigonometrik fonksiyon kullanarak başlangıç ve bitiş jerkü kontrol edilmiştir. Trigonometrik splinlerle ilgili yukarıda bahsedilen bütün bu olumlu özelliklerinin yanısıra bu çalışmada trigonometrik splinler için bir eksiklik de tespit edilmiştir. Ara noktalarındaki hız, ivme ve jerk değerleri ile bu ara noktalar arasında kalan segmentlerdeki hız, ivme ve jerk değerleri birbirinden çok farklı çıkmıştır. Bu farkı azaltmak için segment zamanlarının uzatılarak robotun yörüngeyi daha yavaş takip etmesi sağlanabilir. Bu açıdan trigonometrik splinler düşük hız gerektiren uygulamalarda kullanılabilir. Örnek olarak mobil robotlar, bacaklı robotlar, özellikle medikal robotlarda kullanılabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Olabi A., Béarée R., Nyiri E. & Gibaru O., "Enhanced trajectory planning for machining with industrial six-axis robots", In Proceedings of the *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Vi a del Mar, pp. 500-506, (2010).
- 2) Perumaal S. S. & Jawahar N., "Automated trajectory planner of industrial robot for pick-and-place task", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10: 1-17, (2013).
- 3) Lin C., Chang P. & Luh J., "Formulation and optimization of cubic polynomial joint trajectories for industrial robots", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 28(12): 1066-1074, (1983).
- 4) Craig J., "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", *Addison-Wesley Pub*, New York, (1989).
- 5) Simon D. & Isik, C., "Optimal trigonometric robot joint trajectories", *Robotica*, 9(04): 379-386, (1991).
- 6) Dyllong E. & Visioli, A., "Planning and real-time modifications of a trajectory using spline techniques", *Robotica*, 21(5): 475-482, (2003).
- 7) Aribowo W. & Terashima K., "Cubic spline trajectory planning and vibration suppression of semiconductor wafer transfer robot arm", *International Journal of Automation Technology*, 8(2): 265-274, (2014).
- 8) Paulos E., "On-line collision avoidance for multiple robots using b-splines", Report No. UCB//CSD-98-977, University of California, Berkeley, Computer Science Division, (1998).
- 9) Costantinescu D. & Croft E. A., "Smooth and time-optimal trajectory planning for industrial manipulators along specified paths", *Journal of Robotic Systems*, 17(5): 233-249, (2000).
- 10) Visioli A., "Trajectory planning of robot manipulators by using algebraic and trigonometric splines", *Robotica*, 18: 611-631, (2000).
- 11) Piazzzi A. & Visioli A., "Global minimum-jerk trajectory planning of robot manipulators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 47(1): 140-149, (2000).
- 12) Kolter J. Z. & Ng, A. Y., "Task-space trajectories via cubic spline optimization", In Proceedings of the *ICRA '09, IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1675-1682, Kobe, (2009, May).
- 13) Tondu B. & Bazaz S. A., "The three-cubic method: an optimal online robot joint trajectory generator under velocity, acceleration, and wandering constraints", *The International Journal of Robotics Research*, 18(9): 893-901, (1999).
- 14) Chettibi T., Lehtihet H. E., Haddad M. & Hanchi, S., "Minimum cost trajectory planning for industrial robots", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 23(4): 703-715, (2004).
- 15) Gasparetto A. & Zanotto, V., "A technique for time-jerk optimal planning of robot trajectories", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3): 415-426, (2008).
- 16) Sharma B., Sehgal, S. & Nain, A., "Particle swarm optimization and genetic algorithm based optimal power flow solutions", *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management*, 2(7): 307-315, (2013).
- 17) Ozsaglam M. Y. & Cunkas M., "Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçaçık Sürü Optimizasyonu Algoritması", *Politeknik Dergisi*, 11(4): 299-305, (2008).
- 18) Kucuk S. & Bingul Z. "Inverse kinematics solutions for industrial robot manipulators with offset wrists", *Applied Mathematical Modelling*, 38(7-8): 1983-1999, (2014).
- 19) Schoenberg I. J., "On trigonometric spline interpolation", *Journal of Mathematics and Mechanics*, 13(5): 795, (1964).
- 20) Koch P. E., "Error bounds for interpolation by fourth order trigonometric splines", In *Approximation Theory and Spline Functions*, pp. 349-360, *Springer*, Netherlands, (1984).
- 21) Lyche T. & Winther R., "A stable recurrence relation for trigonometric B-splines", *Journal of Approximation Theory*, 25(3): 266-279, (1979).
- 22) Kennedy J. & Eberhart R., "Particle swarm optimization", In Proceedings of the *International Conference on Neural Networks*, (1995).
- 23) Toz M. & Kucuk S., "Dexterous workspace optimization of an asymmetric six-degree of freedom Stewart-Gough platform type manipulator", *Robotics and Autonomous Systems*, 61(12): 1516-1528, (2013).
- 24) Toz M. & Kucuk S., "Dimensional optimization of 6-DOF 3-CCC type asymmetric parallel manipulator", *Advanced Robotics*, 28(9): 625-637, (2014).

- 25) Kiranyaz S., Pulkkinen J. & Gabbouj M., “Multi-dimensional particle swarm optimization in dynamic environments”, *Expert Systems with Applications*, 38(3): 2212-2223, (2011).
- 26) Kucuk S., “Energy minimization for 3-RRR fully planar parallel manipulator using particle swarm optimization”, *Mechanism and Machine Theory*, 62: 129-149, (2013).
- 27) Gasparetto A. & Zanutto V., “A new method for smooth trajectory planning of robot manipulators”, *Mechanism and Machine Theory*, 42(4): 455-471, (2007).

Pasternak Zemine Oturan Eksenel Yüke Maruz Homojen Olmayan Kirişin Serbest Titreşimi

Mehmet AVCAR

Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

(Geliş / Received : 12.02.2016 ; Kabul / Accepted : 04.04.2016)

ÖZ

Sunulan çalışmada, elastik zemine oturan eksenel yüke maruz homojen olmayan (HO) malzemelerden oluşan kirişin serbest titreşimi incelenmiştir. Malzemenin homojen olmaması kalınlık doğrultusunda elastisite modülünün üstel fonksiyon şeklinde değişimi ile karakterize edilmiş, yoğunluğun sabit kaldığı varsayılmıştır. Ayrıca, elastik zeminin lineer, homojen ve izotrop olduğu varsayılmış, zeminin kirişe tepkisi iki parametrelili Pasternak modeli kullanılarak modellenmiştir. İlk olarak Bernoulli-Euler kiriş teorisi kullanılarak Pasternak zemine oturan HO kirişin hareket denklemleri elde edilmiştir. Elde edilen denklemler basit mesnetli sınır koşulları için çözülmüştür. Sunulan formülasyonun doğruluğu bir karşılaştırma çalışması yapılarak teyit edilmiştir. HO malzeme özelliklerinin, elastik zemin parametrelerinin ve eksenel yükün kirişin ilk üç moddaki serbest titreşim frekans parametresi değerlerine etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Titreşim, Homojen Olmayan Malzeme, Elastik Zemin, Eksenel Yük, Kiriş

Free Vibration of Non-Homogeneous Beam Subjected to Axial Force Resting on Pasternak Foundation

ABSTRACT

In the present study free vibration of non-homogeneous beam subjected to the axial force resting on elastic foundation has been examined. Non-homogeneity of the material is characterized considering the exponential variation of the Young's modulus along the thickness direction of the beam while the value of density is assumed to remain constant. The foundation medium is assumed to be linear, homogenous and isotropic, and it is modeled by the Pasternak model with two parameters for describing the reaction of the elastic foundation on the beam. Firstly, the equation of motion of non-homogeneous beam subjected to axial force resting on Pasternak foundation is provided within the frame work of Bernoulli-Euler beam theory. The resulting equation is solved according to the simply supported boundary conditions. To show the accuracy of the present results, a comparison is performed and a good agreement is achieved. The effects of non-homogeneous material properties, elastic foundation parameters and axial load on the values of frequency parameters of the first three modes are examined.

Key Words: Vibration, Non-homogeneous Material, Elastic Foundation, Axial Load, Beam

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yapıların modern tasarımı ve analizinde, üst yapı-temel-zemin etkileşimi doğru ve uygulama amaçlarına hizmet edecek basitliğe sahip bir şekilde hesaba katılmalıdır. Bu bağlamda, elastik zemine oturan kiriş kavramı, yapı, geoteknik, karayolu ve demiryolu mühendisliği problemlerinin modellenmesi ve analizi için önemli bir araçtır. Demiryolu hatları, otoyol asfaltları, sürekli mesnetli boru hatları ve şerit temeller elastik zemine oturan kirişlere verilebilecek pratik örneklerdendir [1-3].

Zemin çok karmaşık bir yapıya sahiptir ve bu nedenle zemin davranışını modellemek için çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar arasında bilimsel çalışmalarda ve uygulamalarda en fazla benimsenen varsayım Winkler zemin modelidir [4-11]. Fakat Winkler tek parametrelili modelinde, zeminin sürekli dağılımlı birbirinden bağımsız doğrusal yaylardan oluştuğu

varsayıldığından, zeminin yüklü ve yüksüz kısımları arasındaki yer değiştirme süreksizliği önemli bir sorun oluşturur, çünkü gerçekte zemin yüzeyi herhangi bir süreksizlik göstermez. Bu nedenle, fiziksel olarak daha hassas ve matematiksel açıdan basit bir model olan Pasternak iki parametrelili zemin modeli geliştirilmiştir [12]. Pasternak modelindeki ilk zemin parametresi Winkler modelindekiyle aynı olup, ikinci parametre ise kayma tabakasının rijitliğidir. Hâlihazırda, iki parametrelili Pasternak zemine oturan kirişlerin serbest titreşimi literatürde oldukça ilgi çeken konulardan biridir. [13-26].

Yukarıda bahsi geçen tüm çalışmalar homojen (H) kirişler için, yani kirişin her bir noktasında mekanik özelliklerinin sabit olduğu varsayımı ile yapılmıştır. Hâlbuki doğada oldukça çok HO malzeme mevcuttur, örneğin kontrplak, kereste, fiber takviyeli plastik doğal olarak HO malzeme ve çelik alaşımlarda yer alan cam epoksi ve bor epoksi yapay olarak HO malzemedir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri uzay koordinatlarıyla sürekli ya da süreksiz olarak keyfi bir biçimde değişebilir

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: mehmetavcar@sdu.edu.tr

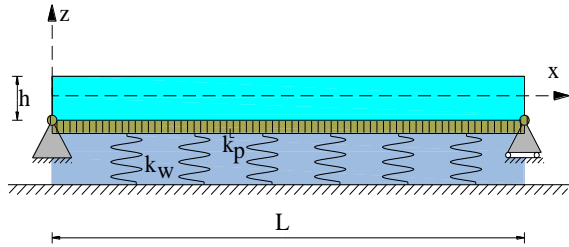
Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 507-512

[27-29]. HO malzemelerin günümüz mühendislik uygulamalarında ve teknolojilerinde giderek artan kullanımı, araştırmacıları elastik zemine oturan HO kirişlerin titreşim problemlerini incelemeye yöneltmiştir [30-36].

Yapılan literatür araştırmasına göre, Pasternak zemine oturan aksel yüküne maruz ve elastisite modülünün kalınlık doğrultusunda üstel fonksiyon şeklinde değişimi ile karakterize edilen HO malzeme özelliklerine sahip kirişin serbest titreşimi henüz incelenmemiştir. Sunulan çalışmada bu problemin çözümü ele alınmıştır.

2. PROBLEMİN FORMÜLASYONU VE ÇÖZÜMÜ (FORMULATION AND SOLUTION OF THE PROBLEM)

Uzunluğu L , yüksekliği h olan Pasternak zemine oturan kirişi ele alalım (Şekil 1.)



Şekil 1. Pasternak zemine oturan kiriş (Beam resting on Pasternak foundation)

Pasternak zemine oturan aksel basınç yüküne maruz H kirişin temel denklemi aşağıdaki şekildedir [16,17,24]:

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + P \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + k_w w - k_p \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

Burada, E elastisite modülü, I atalet momenti, P aksel yük, ρ yoğunluk, A enkesit alanı, k_w Winkler zemin-katsayısı, k_p Pasternak zemin-katsayısı, w çökme, t zamandır. Ayrıca, sunulan çalışmada aksel yükün basınç olması hali (+), çekme olması ise (-) olarak dikkate alınmıştır.

HO kiriş malzemesi, elastisite modülünün kalınlık doğrultusunda üstel fonksiyon şeklinde değişimiyle karakterize edilmiştir [31,36]:

$$E_1 = E e^{\alpha(\bar{z}-0.5)} \quad (2)$$

Burada, $\bar{z} = z/h$, α homojen olmama parametresi ($-1 \leq \alpha \leq 1$) olup yoğunluğun sabit kaldığı varsayılmıştır.

(2) ifadesi (1)'de dikkate alındığında Pasternak zemine oturan aksel basınç yüküne maruz HO kirişin hareket denklemi aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$\lambda \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + P \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + k_w w - k_p \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (3)$$

Burada λ , HO kirişin eğilme rijitliği olup aşağıdaki tanım geçerlidir:

$$\lambda = E b h^3 \int_{-1/2}^{1/2} \bar{z}^2 e^{\alpha(1-\bar{z})} d\bar{z} \quad (4)$$

(3) denkleminin çözümü aşağıdaki şekilde aranabilir [37]:

$$w(x, t) = a(x)b(t) \quad (5)$$

Burada a ve b sırasıyla zaman ve konumdan bağımsızdır.

(5) ifadesi (1) denkleminde dikkate alındığında aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\lambda a^{iv}(x)b(t) + P a^{ii}(x)b(t) + \rho A a(x)b^{ii}(t) + k_w a(x)b(t) - k_p a^{ii}(x)b(t) = 0 \quad (6)$$

Zamana bağlı fonksiyon aşağıdaki şekildedir:

$$b(t) = c_1 \cos \omega t + c_2 \sin \omega t \quad (7)$$

(7) denklemi (6)'da yerine yazılıp bazı matematiksel işlem uygulandıktan sonra aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\lambda a^{iv}(x) + P a^{ii}(x) - \rho A a(x)\omega^2 + k_w a(x) - k_p a^{ii}(x) = 0 \quad (8)$$

(8) denkleminin çözümü aşağıdaki gibi aranır:

$$a(x) = d_1 \sinh(\beta x) + d_2 \cosh(\beta x) + d_3 \sin(\beta x) + d_4 \cos(\beta x) \quad (9)$$

(9) denklemi (8)'te yerine yazıldığında şu denklem elde edilir:

$$\lambda \beta^4 [d_1 \sinh(\beta x) + d_2 \cosh(\beta x) + d_3 \sin(\beta x) + d_4 \cos(\beta x)] + [P - k_p] \beta^2 [d_1 \sinh(\beta x) + d_2 \cosh(\beta x) - d_3 \sin(\beta x) - d_4 \cos(\beta x)] - [\rho A \xi \omega^2 - k_w] [d_1 \sinh(\beta x) + d_2 \cosh(\beta x) + d_3 \sin(\beta x) + d_4 \cos(\beta x)] = 0 \quad (10)$$

İncelenen problemde sınır koşulları basit mesnetli olduğundan aşağıdaki ifadeler geçerlidir:

$$a(0) = a^{ii}(0) = a(L) = a^{ii}(L) = 0 \quad (11)$$

(11), sırasıyla (9) ve (10) denklemlerinde dikkate alınıp bazı matematiksel işlemlerden sonra Pasternak zemine oturan aksel basınç yüküne maruz her iki ucu basit mesnetli HO kiriş için aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\lambda \left(\frac{n\pi}{L} \right)^4 - [P - k_p] \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 - [\rho A \omega^2 - k_w] = 0 \quad (12)$$

(12) denkleminde Pasternak zemine oturan aksel basınç yüküne maruz basit mesnetli HO kirişin serbest titreşim frekansı aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\omega = \sqrt{\frac{(n\pi)^2 [\lambda(n\pi)^2 - PL^2 + k_p L^2] + k_w L^4}{\rho A L^4}} \quad (13)$$

Burada n , mod sayısıdır.

3. SAYISAL HESAPLAMALAR VE TARTIŞMA (NUMERICAL COMPUTATIONS AND DISCUSSION)

Bu bölümde sunulan problemi incelemek için çeşitli sayısal örnekler verilmiştir. Tüm sayısal hesaplamalarda aşağıdaki boyutsuz parametreler kullanılmıştır:

$$\varpi = \omega L^2 \sqrt{\frac{\rho A}{EI}}, \quad T = \frac{PL^2}{(\pi^2 EI)}, \quad K_w = \frac{k_w L^4}{EI}, \quad K_p = \frac{k_p L^2}{\pi^2 EI} \quad (14)$$

3.1. Karşılaştırma Çalışması (Comparative Study)

Çizelge 1’de, Winkler-Pasternak zemine oturan eksenel basınç yüküne maruz homojen kirişin ilk üç mod için elde edilen frekans parametre değerleri Yokoyama[16] çalışmasında sonlu elemanlar yöntemiyle sekiz elemanlı model için elde edilmiş sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar sunulan formülasyonun doğruluğunu kanıtlamaktadır.

Çizelge 1. Winkler-Pasternak zemine oturan eksenel basınç yüküne maruz homojen kirişin frekans parametre değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of the values of frequency parameter of homogeneous beam subjected to axial compressive force resting on Winkler-Pasternak foundations)

ϖ				
$K_w = K_p = 0, T = 0$		$K_w = K_p = 0, T = 0.6$		
n	Yokoyama [16]	Sunulan Çalışma	Yokoyama [16]	Sunulan Çalışma
1	9.87	9.870	6.24	6.242
2	39.49	39.478	36.41	36.397
3	88.94	88.826	85.93	85.814
$K_w = 0.6\pi^4, K_p = 0, T = 0.6$ (Winkler Zemin)		$K_w = 0.6\pi^4, K_p = 1, T = 0.6$ (Pasternak Zemin)		
n	Yokoyama [16]	Sunulan Çalışma	Yokoyama [16]	Sunulan Çalışma
1	9.87	9.870	13.96	13.958
2	37.20	37.192	42.11	42.105
3	86.27	86.154	91.21	91.100

3.2. Sayısal Örnekler (Numerical Examples)

Örnek 1. Çizelge 2’de, α homojen olmama parametresinin eksenel basınç yüküne maruz Winkler-Pasternak elastik zemine oturan/oturmuyan kirişin, ϖ , serbest titreşim frekans parametre değerlerine etkisi incelenmiştir. Burada eksenel basınç yükü parametresi $T = 0.6$ olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan, α homojen olmama parametresi arttığında her üç durumda da, ϖ , frekans parametre değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca, α homojen olmama parametresinin, ϖ , frekans parametre değerleri üzerinde en yüksek etkiye $\alpha = -1$ olduğunda, en az etkiye $\alpha = 0.5$ olduğunda sahip olduğu bulunmuştur. Elastik zemin etkisi dikkate alındığında, α homojen olmama parametresinin değişiminin, kirişin ϖ , frekans

parametre değerleri üzerindeki etkisinin azaldığı görülmüştür.

Gizelge 2. Winkler-Pasternak zemine oturan eksenel basınç yüküne maruz kirişin ϖ frekans parametre değerlerinin α homojen olmama parametresine göre değişimi (Variation of the values of frequency parameter, ϖ , of beam subjected to axial compressive force resting on Winkler-Pasternak foundations versus non-homogeneity parameter, α)

ϖ					
Zeminsiz ($K_w = 0, K_p = 0$)					
n	$\alpha = -1$	$\alpha = -0.5$	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$
1	10.695	8.306	6.242	4.341	2.266
2	50.313	42.486	36.397	31.668	27.991
3	116.073	98.974	85.814	75.726	67.999
Winkler Zemin ($K_w = 0.6\pi^4, K_p = 0$)					
n	$\alpha = -1$	$\alpha = -0.5$	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$
1	13.146	11.288	9.870	8.791	7.974
2	50.891	43.169	37.192	32.578	29.016
3	116.324	99.269	86.154	76.111	68.428
Pasternak Zemin ($K_w = 0.6\pi^4, K_p = 1$)					
n	$\alpha = -1$	$\alpha = -0.5$	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 1$
1	16.439	14.995	13.958	13.217	12.688
2	54.585	47.468	42.105	38.091	35.094
3	120.033	103.590	91.100	81.668	74.559

Örnek 2. Çizelge 3’te, K_w ve K_p zemin parametrelerinin eksenel basınç yüküne maruz Winkler-Pasternak elastik zemine oturan H ve HO kirişin, ϖ , titreşim frekans parametre değerlerine etkisi incelenmiştir. Burada homojen olmama parametresi, $\alpha = 1$ ve eksenel basınç parametresi $T=0.6$ olarak dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlardan, K_w ve K_p zemin parametreleri arttıkça H ve HO kirişin, ϖ , frekans parametre değerlerinin arttığı görülmüştür. Elastik zemin parametrelerinin değişiminin, H ve HO kirişin, ϖ , frekans parametre değerlerine olan etkisinin temel modda (n=1) en yüksek olduğu, fakat mod sayısı arttıkça bu etkinin giderek azaldığı saptanmıştır. Ayrıca, elastik zemin parametrelerinin değişiminin, HO kirişin, ϖ , frekans parametre değerlerine olan etkisi, H kirişin, ϖ , frekans parametre değerlerine olan etkisine kıyasla daha fazla olduğu bulunmuştur. Bunlarla birlikte, Pasternak zeminin H ve HO kirişin, ϖ , frekans parametre değerlerine etkisi Winkler zeminden daha yüksek olduğu görülmüştür.

Çizelge 3. Winkler-Pasternak zemine oturan aksel basınç yüküne maruz kirişin ω frekans parametre değerlerinin K_W ve K_P zemin parametrelerine göre değişimi (Variation of the values of frequency parameter, ω , of beam subjected to axial compressive force resting on Winkler-Pasternak foundations versus elastic foundation parameters, K_W and K_P)

		ω					
K_W	K_P	H Durum			HO Durum		
		n=1	n=2	n=3	n=1	n=2	n=3
		Zeminsiz					
0	0	6.242	36.397	85.814	2.266	27.991	67.999
Winkler Zemin							
$0.4\pi^4$	0	8.828	36.929	86.041	6.641	28.678	68.285
$0.6\pi^4$		9.870	37.192	86.154	7.974	29.016	68.428
π^4		11.678	37.712	86.380	10.126	29.680	68.712
Pasternak Zemin							
$0.4\pi^4$	0.5	11.253	39.478	88.552	9.633	31.895	71.423
$0.6\pi^4$		12.088	39.724	88.662	10.596	32.199	71.559
π^4		13.604	40.212	88.881	12.298	32.798	71.831
$0.4\pi^4$	1	13.241	41.873	90.993	11.896	34.815	74.428
$0.6\pi^4$		13.958	42.105	91.100	12.688	35.094	74.559
π^4		15.290	42.565	91.314	14.140	35.644	74.820

Çizelge 4. Winkler-Pasternak zemine oturan H ve HO kirişlerin frekans parametre değerlerinin T aksel yük parametresine göre değişimi (Variation of the values of frequency parameter, ω , of beam resting on Winkler-Pasternak foundations versus axial load parameter, T)

		ω									
		H Durum					HO Durum				
n		Zeminsiz($K_W = 0, K_P = 0$)					Zeminsiz($K_W = 0, K_P = 0$)				
		$T = -0.6$	$T = -0.3$	$T = 0$	$T = 0.3$	$T = 0.6$	$T = -0.6$	$T = -0.3$	$T = 0$	$T = 0.3$	$T = 0.6$
1		12.484	11.253	9.870	8.258	6.242	15.208	14.214	13.146	11.983	10.695
2		42.336	40.932	39.478	37.969	36.397	54.763	53.685	52.585	51.462	50.313
3		91.740	90.295	88.826	87.333	85.814	120.519	119.423	118.317	117.200	116.073
n		Winkler Zemin($K_W = 0.6\pi^4, K_P = 0$)					Winkler Zemin($K_W = 0.6\pi^4, K_P = 0$)				
		$T = -0.6$	$T = -0.3$	$T = 0$	$T = 0.3$	$T = 0.6$	$T = -0.6$	$T = -0.3$	$T = 0$	$T = 0.3$	$T = 0.6$
1		14.639	13.604	12.484	11.253	9.870	17.021	16.140	15.208	14.214	13.146
2		43.021	41.640	40.212	38.731	37.192	55.294	54.227	53.138	52.027	50.891
3		92.058	90.618	89.155	87.667	86.154	120.762	119.668	118.564	117.449	116.324
n		Pasternak Zemin ($K_W = 0.6\pi^4, K_P = 1$)					Pasternak Zemin ($K_W = 0.6\pi^4, K_P = 1$)				
		$T = -0.6$	$T = -0.3$	$T = 0$	$T = 0.3$	$T = 0.6$	$T = -0.6$	$T = -0.3$	$T = 0$	$T = 0.3$	$T = 0.6$
1		17.655	16.807	15.914	14.968	13.958	19.676	18.918	18.130	17.305	16.439
2		47.333	46.082	44.795	43.471	42.105	58.712	57.708	56.686	55.645	54.585
3		96.702	95.332	93.943	92.532	91.100	124.338	123.276	122.205	121.124	120.033

Örnek 3. Çizelge 4’te, aksel yükün yönü ve şiddetinin Winkler-Pasternak elastik zemine oturan/oturmayan H ve HO kirişin, ω , titreşim frekansı parametre değerlerine etkisi incelenmiştir. Burada homojen olmama parametresi $\alpha = -1$ olarak dikkate alınmıştır. Elde

edilen sonuçlardan, T aksel yük parametresinin çekme olması durumunda kirişin frekans parametrelerinin arttığı, basınç olduğunda ise azaldığı görülmektedir. Aksel yükün değişiminin H ve HO kirişin, ω , frekans parametre değerlerine etkisi, yükün basınç olması

durumunda çekmeye kıyasla daha fazla olduğu ve gözlemlenmiştir. Eksenel yük parametresinin değişiminin kirişin ω , frekans parametre değerlerine etkisi artan mod sayısı elastik zemin parametrelerinin ve HO malzeme özelliklerinin dikkate alınmasıyla azaldığı görülmüştür.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Sunulan çalışmada, elastik zemine oturan eksenel yüke maruz HO malzemelerden oluşan kirişin serbest titreşimi incelenmiştir. HO malzeme özelliklerinin, elastik zemin parametrelerinin ve eksenel yükün kirişin ilk üç moddaki serbest titreşim frekans parametre değerlerine olan etkilerini göstermek için üç sayısal örnek sunulmuştur.

Kısaca aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- HO malzeme özelliklerinin, kirişin frekans parametre değerlerine olan etkisi, homojen olmama parametresinin seçimine bağlı olarak değişmektedir
- Elastik zemin parametrelerinin değişiminin, kirişin frekans parametre değerlerine olan etkisi, temel modda ve HO durumda en yüksek etkiye sahiptir
- Pasternak zemin, Winkler zemine kıyasla kirişin frekans parametre değerleri üzerinde daha büyük etkiye sahiptir
- Eksenel yük basınç olduğunda, kirişin frekans parametre değerlerine olan etkisi çekmeye kıyasla daha fazladır.
- Eksenel yükün değerinin değişiminin frekans parametre değerlerine olan etkisi, artan mod sayısı, elastik zemin katsayıları ve HO malzemelerin dikkate alınmasıyla azalmaktadır.

Sonuç olarak, HO malzeme özelliklerinin, eksenel yükün ve elastik zeminin kirişin serbest titreşim frekans parametre değerleri üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, bu makalede analitik olarak elde edilen çözümler, ileriki çalışmalarda sonlu elemanlar veya farklı çözüm yöntemleri ile elde edilecek sonuçlarla kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Hetenyi, M., "Beams on Elastic Foundations", *The University of Michigan Press*, Ann Arbor, (1946).
- [2] Selvadurai, A.P.S., "Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction", Amsterdam: Elsevier; (1979).
- [3] Kerr, A.D., "Elastic and viscoelastic foundation models", *Journal of Applied Mechanics*, 31: 3491-498, (1964).
- [4] Winkler, E., "Die Lehre Von Der Elastizität Und Festigkeit, Dominicus", Prague, (1867).
- [5] Eisenberger, M. and Clastornik, J. "Vibration and buckling of beam on a variable Winkler elastic foundation", *Journal of Sound and Vibration*, 115: 233-241, (1987).
- [6] Civalek, Ö. ve Demir, Ç., "Elastik zemine oturan kirişlerin ayırık tekil konvolüsyon ve harmonik diferansiyel quadrature yöntemleriyle analizi", *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11: 56-71, (2009).
- [7] Motaghian, S., Mofid, M. and Alanjari, P., "Exact solution to free vibration of beams partially supported by an elastic foundation", *Scientia Iranica*, 18: 861-866, (2011).
- [8] Mutman, U., "Free vibration analysis of an Euler beam of variable width on the Winkler foundation using homotopy perturbation method", *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 721294, 9 pages, (2013).
- [9] Ozturk B. and Coskun, S.B., "Analytical solution for free vibration analysis of beam on elastic foundation with different support conditions", *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 470927, 7 pages, (2013).
- [10] Yanık, F. ve Yaylı M.O., "Rijit olmayan sinir koşullarında elastik zemine oturan bir çubuğun eksenel titreşim analizi", *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2: 35-44, (2015).
- [11] Emsen E., Mercan K., Akgöz, B. and Civalek O., "Modal analysis of tapered beam-column embedded in Winkler elastic foundation", *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7: 25-35, (2015).
- [12] Pasternak, P.L., "On a new method of analysis of anelastic foundation by means of two foundation constants", Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu i Arkhitekture, Moscow, (1954).
- [13] Wang, T.M. and Stephens, J.E., "Natural frequencies of Timoshenko beams on Pasternak foundations", *Journal of Sound Vibration*, 51: 149-155, (1977).
- [14] Zhaohua, F. and Cook, R.D., "Beam elements on two-parameter elastic foundations", *Journal of Engineering Mechanics*, 109: 1390-402, (1983).
- [15] Franciosi, C. and Masi, A., "Free vibration of foundation beams on two-parameter elastic soil", *Computers and Structures*, 47: 419-426, (1993).
- [16] Yokoyama, T., "Vibration analysis of Timoshenko beam-columns on two-parameter elastic foundations", *Computers and Structures*, 61: 995-1007, (1996).
- [17] Matsunaga, H., "Vibration and buckling of deep beam-columns on two-parameter elastic foundations", *Journal of Sound and Vibration*, 228: 359-376, (1999).
- [18] Morfidis, K. and Avramidis, I.E., "Formulation of a generalized beam element on a two-parameter elastic foundation with semi-rigid connections and rigid offsets", *Computers and Structures*, 80: 1919-1934, (2002).
- [19] Chen, W.Q., Lü, C.F. and Bian, Z.G., "A mixed method for bending and free vibration of beams resting on a Pasternak elastic foundation", *Applied Mathematical Modelling*, 28: 877-890, (2004).
- [20] Auciello, N.M., "Vibrations of Timoshenko beams on two-parameter elastic soil", *Engineering Transactions*, 56: 187-200, (2008).
- [21] Balkaya, M., Kaya M.O. and Saglamer A., "Analysis of the vibration of an elastic beam supported on elastic soil using the differential transform method", *Archives of Applied Mechanics*, 79: 135 - 146, (2009).
- [22] Civalek, Ö and Öztürk, B., "Free vibration analysis of tapered beam-column with pinned ends embedded in

- Winkler-Pasternak elastic foundation”, *Geomechanics and Engineering*, 2: 45-56, (2010).
- [23] Celep, Z., Güler K. and Demir, F., “Response of a completely free beam on a tensionless Pasternak foundation subjected to dynamic load”, *Structural Engineering and Mechanics*, 37: 61-77, (2011).
- [24] Calio, I., Greco, A., “Free vibrations of Timoshenko beam-columns on Pasternak foundations”, *Journal of Vibration and Control*, 19: 686-696, (2013).
- [25] Lee, J.K., Jeong, S. and Lee, J., “Natural frequencies for flexural and torsional vibrations of beams on Pasternak foundation”, *Soils and Foundations*, 54: 1202-1211, (2014).
- [26] Taha, H.M. and Mohamed, N., “Analysis of stressed Timoshenko beams on two parameter foundations”, *KSCE Journal Of Civil Engineering*, 19: 173-179, (2015).
- [27] Lal, R., Kumar, Y. “Transverse vibrations of nonhomogeneous rectangular plates with variable thickness”, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 20: 264-275, (2013).
- [28] Tounsi, A., Houari, M.S.A, Benyoucef, S. and Bedia E.A.A., “A refined trigonometric shear deformation theory for thermoelastic bending of functionally graded sandwich plates”, *Aerospace Science and Technology*, 24: 209-220, (2013).
- [29] Avcar, M., “Effects of rotary inertia shear deformation and non-homogeneity on frequencies of beam”, *Structural Engineering and Mechanics*, 55: 871-884, (2015).
- [30] Elishakoff, I., “Some unexpected results in vibrations of non-homogeneous beams on elastic foundation”, *Chaos Solitons and Fractals*, 12: 2177-2218, (2001).
- [31] Avcar, M., “Elastik zemin üzerinde bulunan her iki ucu ankastre mesnetli rastgele ve sürekli homojen olmayan kirişin serbest titreşimi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1: 33-38, (2010).
- [32] Cetin D. and Simsek, M., “Free vibration of an axially functionally graded pile with pinned ends embedded in Winkler-Pasternak elastic medium”, *Structural Engineering and Mechanics*, 40: 583-594, (2011).
- [33] Duy H.T, Van T.N. and Noh H.C. “Eigen analysis of functionally graded beams with variable cross-section resting on elastic supports and elastic foundation”, *Structural Engineering and Mechanics*, 52: 1033-1049, (2014).
- [34] Esfahani, S.E., Kiani, Y., Komijani, M. and Eslami, M.R., “Vibration of a temperature dependent thermally pre/postbuckled FGM beam over a nonlinear hardening elastic foundation”, *Journal of Applied Mechanics*, 81, 011004, (2014).
- [35] Akbaş, Ş.D., “Free vibration and bending of functionally graded beams resting on elastic foundation”, *Research on Engineering Structures and Materials*, 1: 25-37, (2015).
- [36] Pan, E., “Exact solution for functionally graded anisotropic elastic composite laminates”, *Journal of Composite Materials*, 37: 1903-1920, (2003).
- [37] Avcar, M. and Saplioglu, K., “An artificial neural network application for estimation of natural frequencies of beams”, *International Journal of Advanced Computer Sciences and Applications*, 6: 94-102, (2015).

Ceviz ve Armut Odunlarında Yapışma Direncinin Belirlenmesi

Cevdet SÖĞÜTLÜ

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ağaççşleri Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06500 Teknikokullar, ANKARA

(Geliş / Received : 18.02.2016 ; Kabul / Accepted : 19.03.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, 6, 9 ve 12 m/dk besleme hızında, kesiş yönünde ve kesiş yönüne ters besleme yapılarak rendelenen ceviz (*Juglans regia* L.) ve armut (*Pirus communis* L.) odunlarında yapışma direnci belirlenmiştir. Deney örnekleri 4 bıçaklı, 85 mm mil çapına sahip yatay freze makinesinde, 7200 devir/dakika ve 1,4 mm talaş kalınlığında rendelenmiştir. Örneklerin yapıştırılmasında poliüretan (PU) ve polivinilasetat (PVA) tutkallar kullanılmıştır. Yapışma direnci, TS EN 205 standartlarına göre örneklere çekmede makaslama deneyleri uygulanarak belirlenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, en yüksek yapışma direnci, mil dönüş yönünde rendelenerek PVA tutkal ile yapıştırılan cevizde (11,23 N/mm²), en düşük ise mil dönüş yönüne ters rendelenerek PU tutkal ile yapıştırılan armutta (8,29 N/mm²) elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapışma direnci, çekmede makaslama testi, ceviz odunu, armut odunu, besleme hızı, kesiş yönü

Determination of the Bonding Strength on the Walnut and Pear Wood

ABSTRACT

In this study, tensile shear strength was determined for walnut (*Juglans regia* L.) and pear (*Pirus communis* L.) woods at 6, 9 and 12 m/min feed rate, cutting direction and opposite of cutting direction. The test samples were planed with 4-blade, horizontal milling machines with 85 mm shaft diameter, 7200 rpm and the chip thickness of 1.4 mm Polyurethane (PU) and polyvinyl acetate (PVA) adhesives were used for bonding of the test samples. Bonding strength was determined by applying tensile shear tests to the samples in accordance with TS EN 205 standard. According to the results of the study, the highest bonding strength was obtained in walnut samples, glued with PVA (11.23 N/mm²) and planed to cutting direction while the lowest value was found from pear samples, were glued with PU (8.29 N/mm²) and planed to opposite of the cutting direction.

Key words: Bonding strength, tensile share test, walnut wood, pear wood, feed rate, cutting direction

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İç ve dış dekorasyon elemanlarının üretiminde kullanılan ağaç malzeme, biçme, rendeleme ve zımparalama gibi değişik işlemlerden geçirilerek şekillendirilmektedir. Uygulanan işlemlerden sonra elde edilen yüzeyin pürüzlülük miktarı, üstyüzey işlemlerinin ve birleştirmelerde uygulanan tutkalın başarısını etkilemektedir [1]. Kendine özgü çok sayıda avantajlarının olması, ağaç malzemeyi çeşitli uygulamalar için çekici hâle getirmesine karşın ahşap elemanların birbirleriyle veya diğer yapı elemanlarıyla birleştirilmesindeki zorluklar bulunmaktadır. Tutkal kullanımı, bu zorlukları önemli ölçüde gidermiştir. Özellikle, sentetik reçinelerin geliştirilmesi ile birlikte mobilya üretiminde teknik ve yapısal değişimler olmuştur [2,3]. Tutkalın birleştirmelerde kullanılabilmesi sayesinde, estetik ve teknik yönden olumsuzluk sayılan budak, reçine keseleri gibi ağaç kusurları atılarak küçük ölçülerdeki parçalarından istenilen özelliklerde malzemeler üretilebilmiştir.

Ahşap malzemenin makinelerde şekillendirilmesi sürecinde, hücrelerinin değişik kesiciler ile kesilmesi sonucu, trahe, traheid, özışın, paraşim, reçine kanalları ve lifler arasında oyuklar oluşmaktadır. Bu oyukların ölçüsünde ise ahşap malzemenin başta hücre boşlukları olmak üzere lif yapısı, yıllık halka genişliği, özışınları, budaklılık durumu gibi heterojen özellikli anatomik yapısı da etkili olmaktadır [4].

Yüzey pürüzlülüğü ve tutkalın yapışma direncine, ağaç türü, farklı şartlarda rendeleme ve zımparalamanın etkili olduğu [5] rendelemelerde besleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü artarken mil dönüş sayısı ve bıçak sayısı arttıkça yüzey pürüzlülüğünün azaldığı bildirilmiştir [1,6].

Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesinde, ölçmenin liflere dik, lifler yönünde veya 45° açı ile yapılmasının, yüzey pürüzlülüğünde doğrusal olmayan bir değişim gösterdiği, ayrıca yüzey pürüzlülüğünün yapışma değerlerini belirgin şekilde etkilediği tespit edilmiştir [7].

Tutkal endüstrisi, tutkalın diğer birleştirme malzemelerine göre avantajlarının olması sayesinde hızlı büyümektedir [8]. Ahşap yapıştırma, mobilya ve yapı elemanlarının kalıcı olarak birleştirilmesi için en

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: cevdet@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 513-518

etkili yöntemlerden biridir. Tutkal hazırlama işlemi sırasında meydana gelen teknolojik hatalar tutkallı ağaç birleştirmelerinin direnç özelliklerinde farklılıklara neden olabilmektedir [9]. Ayrıca ağaç malzemenin anatomik yapısı dahil hemen hemen tüm özellikleri yapışma direncinde önemli rol oynadığı [10] ve yoğunluk artışının yapışma direncini artırdığı bildirilmiştir [11].

Ahşap köşe birleştirmelerinde polivinilasetat tutkal ile birleştirilen örneklerin poliüretan tutkal ile birleştirilen örneklerle göre daha yüksek eğilme dayanımı gösterdiği belirlenmiştir [12].

Literatür bilgilerinden de anlaşılacağı gibi, gerek yüzey pürüzlülüğü gerekse tutkalların performansı üzerine çalışmalar mevcut olup, farklı koşullarda işlenerek elde edilen yüzeylerde yapışma performansının incelenmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada, farklı besleme hızı ve kesiş yönlerinde rendelenen ceviz ve armut odunlarının poliüretan (PU) ve polivinilasetat (PVA) tutkallar ile yapıştırılarak elde edilen örneklerin yapışma direncinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. MALZEME VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHODOLOGY)

2.1. Ağaç Malzeme (Wood Material)

Türkiye’de doğal olarak yetişen ceviz (*Juglans regia* L.) ve armut (*Pirus communis* L.) odunları deney malzemesi olarak kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan ağaç malzemeler, Ankara Mobilyacılar Sitesinden TS EN 384 ve TS 2470 esaslarına uygun, budaksız, ardaksız, büyüme kusurları bulunmayan, düzgün lifli ve diri odun kısmı olmasına özen gösterilmiştir [13,14].

2.2. Tutkal (Adhesive)

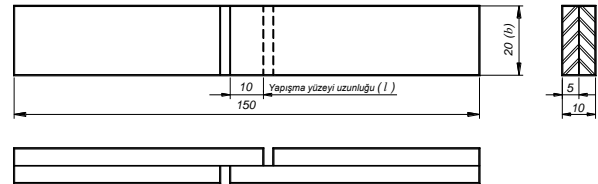
Deney örneklerinin yapıştırılmasında, tek bileşenli polivinilasetat (PVA) ve poliüretan (PU) tutkallar ambalaj vizkozitesinde kullanılmıştır. PVA, Kleiberit firması tarafından üretilerek Klebit 303 kodu ile piyasaya sunulan tek komponentli tutkal olarak TS 5430 EN 204’e göre D3, %5 sertleştirici ilavesi ile çift komponentli olarak kullanıldığında D4 yapışma kalitesine sahip tutkaldır. PU ise aynı firmanın 501 kodu ile piyasaya arz ettiği nemkürlenmeli, poliüretan esaslı TS 5430 EN 204’e göre D4 yapışma kalitesine sahip tutkaldır [15,16].

2.3. Deney Örneklerinin Hazırlanması (Sample Preparation)

Rendeleme örnekleri, 10x50x500 mm boyutlarında ASTM-D 1666-87 belirtilen hususlara göre hazırlanmıştır [17]. Ağaç malzemelerden hazırlanan taslaklar, iyi havalandırılabilen ve doğrudan güneş ışığı almayan ortamda 20±2 °C sıcaklık ve % 65±5 bağıl nem şartlarında denge rurubetine ulaşana kadar istifte bekletilmiştir. Ön kontrolde ortalama rutubet miktarı, rasgele seçilen 20 örnekte % 12±0,5 olarak belirlenmiştir. Taslak parçalar, mil dönüş yönünde (kesiş yönü) ve mil dönüş yönünün tersine (kesiş yönüne ters) besleme yapmak üzere, 6 m/dk, 9m/dk ve 12 m/dk besleme hızı ile rendelenmiştir. Rendeleme işlemi, 85 mm çaplı, 4 kesicili yatay freze makinesinde

gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, kesme derinliği 1,4 mm ve devir sayısı 7200 dev/dk olarak alınmış ve bu koşullar, işlem süresince sabit tutulmuştur. Yapılan rendeleme işlemleri ve değişkenler örneklerin arka yüzeylerine işaretlendikten sonra yüzey pürüzlülüğü ölçümleri yapılarak, çekmede makaslama testi örneklerinin hazırlanmasına geçilmiştir.

Her ağaç türü (2), tutkal çeşidi (2), kesiş yönü (2) ve besleme hızı (3) için 10’ar adet olmak üzere toplam 240 adet deney örneği hazırlanmıştır. Parçaların tutkallanmasında; tutkal çözeltisi üretici firma önerilerine uyularak, yüzeylerden bir tanesine 160–180 g/m² olacak şekilde fırça ile sürülmüştür. Yapıştırma işleminde, pres basıncı 0,9 N/mm², presleme süresi 24 saat, pres sıcaklığı ise 20±2 °C olarak alınmıştır. Örnekler, 20±2 °C sıcaklık ve % 65±5 bağıl nem şartlarında denge rurubetine ulaşınca kadar bekletildikten sonra standartlarda belirtilen ölçülerde kesilerek deneylere hazır hâle getirilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Çekme makaslama deney örneği (mm) (Tensile share test sample)

2.4. Yöntem (Method)

2.4.1. Rutubet (Humidity)

Rutubet tayini, TS 2471 esaslarına uyularak yapılmıştır [18]. Bu maksatla örneklerin ağırlıkları (M_r), analitik terazide 0,01 g hassasiyetle ölçüldükten sonra etüvde 103±2 °C sıcaklıkta değişmez ağırlığa ulaşınca kadar kurutulmuşlardır. Bu durumda, kurutma dolabından alınan örnekler, içerisinde fosforpentoksit (P_2O_5) bulunan desikatörde soğutulduktan sonra tam kuru haldeki ağırlıkları (M_o) ölçülmüştür. Bunlara göre rutubet (R);

$$R = \frac{M_r - M_o}{M_o} \quad M_r : \text{Rutubetli ağırlık} \\ M_o : \text{Tam kuru ağırlık}$$

eşitliğinden hesaplanmıştır.

2.4.2. Yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi (Measurement of surface roughness)

Yüzey pürüzlülüğünün değerlendirilmesinde üç parametre yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunlar, profilin ortalama sapması R_a , düzensizliğin 10 noktadaki yüksekliğinin ortalaması R_z , ve profilin en fazla yüksekliği R_y parametreleridir [19-21]. Bu çalışmada yüzey pürüzlülüğü, ISO 4287 esaslarına uyularak R_a 'ya göre değerlendirilmiştir [22]. Yüzey pürüzlülüğü ölçmede ardışık profil değişimini ölçebilen TIME TR-200 test cihazı kullanılmıştır (Şekil 2). Cihaz, 10 mm/dk ölçme hızı, 5 µm iğne yarıçapı ve 90° mil açısına sahiptir [23]. Ölçme işlemi, 2,5 mm örnek uzunluğu ve 5 örnek

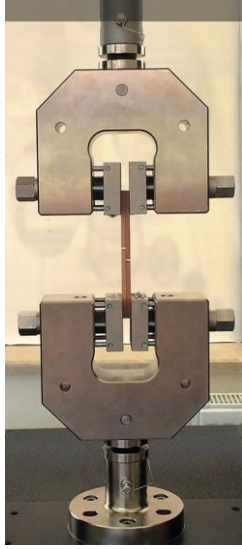
uzunluk sayısı (cut-off) prensibine göre, liflere dik yönde yapılmıştır. Ölçmede hassasiyetin devamlılığı için her 100 ölçüm sonunda, cihazın kalibrasyonu yapılmıştır.



Şekil 2. Yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı (Surface roughness measuring device)

2.4.3. Yapışma direnci (Bonding strength)

Yapışma direnci, TS EN 205 esaslarına uyularak çekmede makaslama testi ile belirlenmiştir [24]. Deney örneği, universal test cihazının germe tertibatına yerleştirilerek, ters yönde 1,6 mm/dk yükleme hızında statik çekme kuvveti uygulanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3. Çekme deney düzeneği (Tensile share test)

Dengeli ve kademeli uygulanan çekme kuvvetiyle, örnek, tutkal hattından koparılmaya çalışılmış ve kopma anındaki maksimum kuvvet (F_{maks}) (N) tespit edilerek makaslama direnci (σ_y);

$$\sigma_y = \frac{F_{maks}}{l \cdot b} = \frac{F_{maks}}{A} \text{ N / mm}^2$$

A : Test yüzey alanı (mm^2)
 b : Yapışma yüzeyi genişliği (mm)
 l : Yapışma yüzeyi uzunluğu (mm)

eşitliğinden hesaplanmıştır.

2.5. Verilerin değerlendirilmesi (Statistical analysis)

Varyans analizi (ANOVA) ile faktör etkileri tespit edilmiştir. Gruplar arası fark önemli çıktığında, Duncan testi ile ortalama değerler arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Böylece, denemeye alınan faktörlerin birbirlerine göre başarı sıralamaları, en küçük önemli fark (LSD) kritik değerine göre homojenlik gruplarına ayrılmak suretiyle belirlenmiştir. Veriler, MSTAT-C paket programında 0,95 güven düzeyinde değerlendirilmiştir.

3. BULGULAR (FINDINGS)

Yüzey pürüzlülüğü ve yapışma direncine ilişkin aritmetik ortalama ve standart hata değerleri Çizelge 1'de verilmiştir.

Yapışma direncine ağaç türü (AT), besleme yönü (BY), besleme hızı (BH) ve tutkal çeşidi (TÇ) etkisine ilişkin Varyans analizi sonuçları Çizelge 2'de verilmiştir.

Yapışma direnci değerlerine ağaç türü, besleme yönü, besleme hızı ve tutkal çeşidi faktörleri ile ağaç türü-besleme hızı, ağaç türü-tutkal çeşidi ve ağaç türü-besleme yönü-tutkal çeşidi karşılıklı etkileri istatistiksel anlamda önemli, diğer etkileşimler ise önemsiz bulunmuştur.

Çizelge 1. Yüzey pürüzlülüğü-yapışma direnci aritmetik ortalama ve standart hata değerleri (Surface roughness-the arithmetic means and standard errors of bonding strength)

Ağaç Türü (AT)	Besleme Yönü (BY)	Besleme hızı (BH) Yüzey Pür. (Ra- μm)	Yapışma Direnci (N/mm ²)	
			PVA	PU
Ceviz	Kesiş yönünde (KY)	6 m/dk. (4,86±0,98)	11,56±0,35	9,39±0,21
		9 m/dk. (5,19±0,13)	10,48±1,26	8,85±0,19
		12 m/dk. (5,43±0,13)	9,28±0,35	7,93±0,29
	Kesiş yönüne ters (KYT)	6 m/dk. (4,66±0,11)	12,21±0,37	10,02±0,24
		9 m/dk. (4,97±0,11)	11,44±0,30	9,54±0,27
		12 m/dk. (5,23±0,08)	10,04±0,20	8,75±0,33
Armut	Kesiş yönünde (KY)	6 m/dk. (2,79±0,03)	11,12±0,47	9,24±0,26
		9 m/dk. (3,56±0,04)	10,34±0,34	9,03±0,29
		12 m/dk. (3,83±0,05)	9,58±0,30	8,21±0,36
	Kesiş yönüne ters (KYT)	6 m/dk. 2,88±0,03)	10,39±0,35	9,07±0,35
		9 m/dk. (3,77±0,04)	9,42±0,46	8,37±0,29
		12 m/dk. (4,00±0,06)	9,00±0,38	7,84±0,41

Çizelge 2. Yapışma direncine ağaç türü, besleme yönü, besleme hızı ve tutkal çeşidinin etkisine ilişkin Varyans analizi sonuçları (Variance analysis for the effect of wood type, feeding direction, feed rate, and adhesive type on the bonding strength)

Varyans kaynağı (Faktörler) P-Değeri							
AT	BY	BH	TÇ	AT x BY	AT x BH	AT x TÇ	BY x BH
0.0000*	0.000*	0.000*	0.000*	0.222 ^{ns}	0.003*	0.001*	0.367 ^{ns}
BY x TÇ	BH x TÇ	AT x BY x BH	AT x BY x TÇ	AT x BH x TÇ	BY x BH x TÇ	AT x BY x BH x TÇ	
0.026*	0,245 ^{ns}	0.228 ^{ns}	0,043*	0,103 ^{ns}	0,182 ^{ns}	0,180 ^{ns}	

Not: * fark 0,95 güven düzeyinde anlamlı, ns fark 0,95 güven düzeyinde anlamsız

Ağaç türü, besleme yönü, besleme hızı ve tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Yapışma direnci; ağaç türü düzeyinde cevizde 9,96 N/mm², armuta 8,98 N/mm² bulunmuştur. Kesiş yönünde

En yüksek yapışma direnci; PVA tutkalı ile yapıştırılan ceviz örneklerde (10,84 N/mm²) bulunmuş, bunu sırası ile PVA tutkalı ile yapıştırılan armut (9,32 N/mm²), PU tutkalı ile yapıştırılan ceviz (9,08 N/mm²) ve PU tutkalı ile yapıştırılan armut (8,63 N/mm²) takip etmiştir.

Çizelge 3. Ağaç türü, besleme yönü, besleme hızı ve tutkal çeşidi düzeyinde Duncan testi karşılaştırma sonuçları (N/mm²) (Comparison results of the Duncan tests for wood type, feeding direction, feed rate, and adhesive type)

Yapışma direnci aritmetik ortalama ve standart hata değerleri (N/mm ²)				
Ağaç türü		Besleme yönü		
Ceviz	Armut	KY	KYT	
9,96±0.13 ^A	8,98±0.12 ^B	9,97±0.12 ^A	8,92±0.12 ^B	
Besleme hızı			Tutkal çeşidi	
6 m/dk	9 m/dk.	12 m/dk.	PVA	PU
9,99±0,14 ^A	9,56±0,13 ^A	8,83±0,14 ^B	10,08±0.19 ^A	8,85±0.12 ^B

Not: Aynı harfler fark olmadığını göstermektedir.

yapılan rendelemelerde 9,97 N/mm² kesiş yönüne ters besleme yapılarak rendelemelerde ise 8,92 N/mm² elde edilmiştir. Besleme hızı düzeyinde 6/dk besleme hızında en yüksek (9,99 N/mm²), 12 m/dk besleme hızında ise en düşük bulunmuş olup, 6 m/dk ile 9 m/dk hızları arasındaki fark önemsiz çıkmıştır (0,95 güven düzeyinde). PVA tutkalı ile yapıştırılan örneklerde (10,08 N/mm²) PU ile yapıştırılan örneklerde (8,85 N/mm²) göre çekme makaslama direnci daha yüksek bulunmuştur.

Ağaç türü–tutkal çeşidi ve tutkal çeşidi–besleme yönü düzeyinde Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Tutkal çeşidi–besleme yönü etkileşimi düzeyinde; en yüksek yapışma direnci kesiş yönü ile PVA tutkalında (10,76 N/mm²), en düşük ise kesiş yönüne ters besleme ile PU tutkalında (8,58 N/mm²) elde edilmiştir. PVA-KYT ile PU-KYT arasındaki fark önemsiz çıkmıştır.

Ağaç türü–tutkal çeşidi ve tutkal çeşidi–besleme yönü düzeyinde Duncan testi karşılaştırma sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

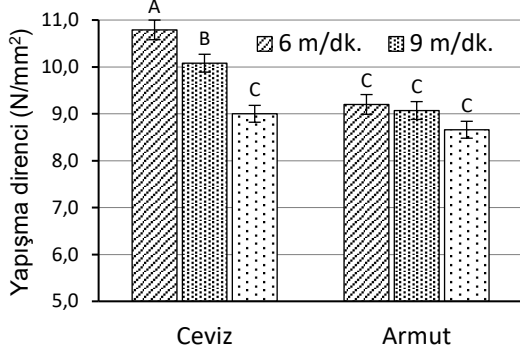
Ağaç türü–besleme hızı düzeyinde karşılaştırma sonuçları Şekil 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Ağaç türü–tutkal çeşidi ve tutkal çeşidi–besleme yönü düzeyinde Duncan testi karşılaştırma sonuçları (N/mm²) (Comparison results of the Duncan tests for wood type–adhesive type and adhesive type–feeding direction)

Yapışma direnci aritmetik ortalama ve standart hata değerleri (N/mm ²)			
Ağaç türü–Tutkal çeşidi			
Ceviz-PVA	Ceviz-PU	Armut-PVA	Armut-PU
10,84±0.21 ^A	9,08±0.16 ^{BC}	9,32±0.18 ^B	8,63±0.17 ^C
Tutkal çeşidi–Besleme Yönü			
PVA- KY	PVA- KYT	PU-KY	PU- KYT
10,76±0.23 ^A	9,37±0.20 ^B	9,13±0.19 ^B	8,58±0.16 ^C

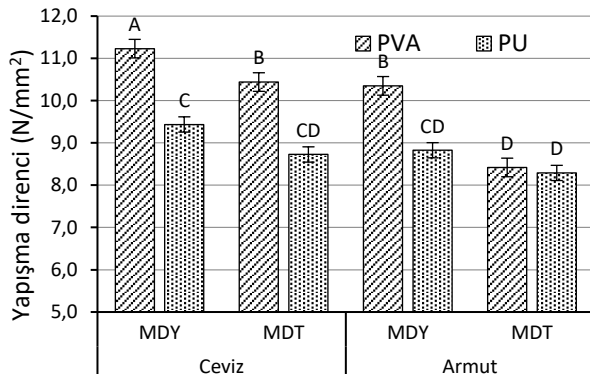
Not: Aynı harfler fark olmadığını göstermektedir (0,95 güven düzeyinde)

Ağaç türü–besleme hızı etkileşimi düzeyinde; en yüksek yapışma direnci 6 m/dk besleme hızı ile cevizde (10,79 N/mm²), en düşük ise 12 m/dk besleme hızı ile armutta (8,66 N/mm²) elde edilmiştir. 12 m/dk besleme hızında rendelenmiş ceviz ile armutun her üç besleme hızı arasındaki fark önemsiz çıkmıştır.



Şekil 4. Ağaç türü–besleme hızı etkileşimi (Interaction of wood species–feed rate)

Ağaç türü–tutkal çeşidi–besleme yönü düzeyinde karşılaştırma sonuçları Şekil 5’te verilmiştir.



Şekil 5. Ağaç türü–tutkal çeşidi–besleme yönü etkileşimi (Interaction of wood species–adhesive type–feeding direction)

Ağaç türü–tutkal çeşidi–kesiş yönü etkileşimi düzeyinde; en yüksek yapışma direnci mil dönüş yönünde rendelenerek PVA tutkal ile yapıştırılan cevizde (11,23 N/mm²), en düşük ise mil dönüş yönüne ters rendelenerek PU tutkal ile yapıştırılan armutta (8,29 N/mm²) elde edilmiştir.

Mil dönüş yönüne ters rendelenerek PVA tutkallı ceviz ile mil dönüş yönünde rendelenen PVA tutkallı armut; mil dönüş yönüne ters rendelenen PU tutkallı ile mil dönüş yönünde rendelenen PU tutkallı armut; mil dönüş yönüne ters rendelenen PVA ve PU tutkallı ceviz etkileşimleri arasındaki fark önemsiz çıkmıştır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Yüzey pürüzlülüğü bakımından; bıçak sayısı, mil çapı, devir sayısı ve talaş kalınlığı sabit olmak kaydıyla besleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Ayrıca beslemenin kesiş yönünde yapılması

halinde pürüzlülük daha düşük değerlerdir. Bu bakımdan elde edilen sonuçlar literatür ile uyumludur [1,5,6]. Besleme hızının düşük seviyede olması halinde yüzey pürüzlülüğünün de düşük değerlerde olması, birim zamanda rendelemeye katılan kesiciye düşen iş miktarının azalması ve böylece kesme kalitesinin artmasından kaynaklanmış olabilir.

Yapışma direnci bakımından; ceviz, armuta göre daha başarılıdır. Mil dönüş yönünde yapılan rendelemede değerlerin daha yüksek düzeyde olması, besleme hızının düşük olması ile yapışma direncinin yüksek değerlerde çıkmasında yüzey pürüzlülüğünün etkili olduğu söylenebilir.

PVA tutkalın PU tutkala göre yüksek değerlerde yapışma direncine sahip olması benzer çalışmaların sonuçları ile benzerlik göstermektedir [12,26]. PVA tutkalın başarısı, yapışma yüzeyini ıslatma yeteneğinin ve ağaç malzemenin hücre boşluklarına girerek spesifik adezyona ilave olarak mekanik adezyon kurma yeteneğinin yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak, rendelenerek elde edilen yapışma yüzeylerinde yapışma direncinin önemli olduğu durumlarda besleme hızının düşük değerlerde tutularak işlem yapılması ve mümkün olduğu durumlarda, gerekli iş güvenliği tedbirleri alınmak sureti ile beslemenin kesiş yönünde yapılması gerekmektedir. Ayrıca ağaç türü–besleme hızı etkileşiminde armutun üç besleme hızı arasındaki farkın önemsiz çıkması nedeni ile birim zamanda daha fazla işlemin yapılabilmesini sağlamak için 12 m/dk besleme hızında rendelenmesi önerilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Söğütü, C., “Rendeleme işleminde bazı faktörlerin toros sediri yüzey pürüzlülüğüne etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 13(3): 177-181, (2010).
- Fatery, K.F., Williamson, T.G., “Wood engineering and construction”, No. Ed. 3, *McGraw-Hill Inc.*, New York, 1-39, (1998).
- Frihart, C.R., Hunt, C.G., “Adhesive with Wood Materials”, Wood handbook: wood as an engineering material”, *United State of America Forest Products Laboratory*, (2010).
- Taylor, J.B., Carrano, A.L., Lemaster, R.L., “Quantification of process parameters in a wood sanding operation”, *Forest Products Journal*, 49(5): 41, (1999).
- Yang, T., Xue, W., Liu, Y., "Influence of machining methods on wood surface roughness and adhesion strength", *Biobase Material Science and Engineering (BMSE), International Conference on. IEEE*, 284-287, (2012).
- İmirzi, H. Ö., Ülker, O., Burdurlu, E., “Effect of densification temperature and some surfacing techniques on the surface roughness of densified scots pine (*Pinus sylvestris* L.)”, *BioResources*, 9(1): 191-209, (2013).
- Vitoste, J., Ukvalbergiene, K., Keturakis, G., “The effects of surface roughness on adhesion strength of coated ash (*Fraxinus excelsior* L.) and Birch (*Betula* L.) wood”, *Materials Science*, 18(4): 347-351, (2012).

8. Skeist, I. (Ed.), "Handbook of adhesives", *Springer Science & Business Media*, (2012).
9. Smardzewski, J., "Technological heterogeneity of adhesive bonds in wood joints", *Wood Science and Technology*, 36(3): 213-227, (2002).
10. Ozcan, S., Ozciftci, A., Hiziroglu, S., Toker, H., "Effects of heat treatment and surface roughness on bonding strength", *Construction and Building Materials*, 33: 7-13, (2012).
11. Söğütü, C., Döngel, N., "Polivinilasetat (PVAc) ve poliüretan (PU) tutkalları ile yapılandırılmış bazı yerli ağaçlarda çekmede makaslama dirençleri", *Politeknik Dergisi*, 10(3): 287-293, (2007).
12. Altun, S., Burdurlu, E., Kılıç, M., "Effect of adhesive type on the bending moment capacity of miter frame corner joints", *BioResources*, 5(3), 1473-1483, (2010).
13. TS EN 384, "Yapı kerestesi-yoğunluk ve mekanik özelliklerin karakteristik değerlerinin tayini", (2010).
14. TS 2470, "Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için numune alma metotları ve genel özellikler", (1978).
15. TS 5430 EN 204, "Yapısal olmayan uygulamalar için termoplastik ahşap yapıştırıcıların sınıflandırılması", (2003).
16. <https://www.kleiberit.com/en/adhesive-groups.html>, (Erişim tarihi: 12.08.2015)
17. ASTM D1666-87, "Standard test methods for conducting machining tests of wood and wood-base materials", (2004).
18. TS 2471, "Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için rutubet miktarı tayini", (1976).
19. Korkut, D.S., Guller, B., "The effects of heat treatment on physical properties and surface roughness of red-bud maple (*Acer trautvetteri* Medw.) wood", *Bioresource Technology*, 99(8): 2846-2851, (2008).
20. Poon, C.Y., Bhushan, B., "Comparison of surface roughness measurements by stylus profiler, AFM and non-contact optical profiler", *Wear*, 190(1): 76-88, (1995).
21. Karagiannis, S., Stavropoulos, P., Ziogas, C., Kechagias, J., "Prediction of surface roughness magnitude in computer numerical controlled end milling processes using neural networks, by considering a set of influence parameters: An aluminium alloy 5083 case study", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(2): 233-244, (2014).
22. ISO 4287, "Geometrical product specifications surface texture profile method terms, definitions and surface texture parameters", (1997).
23. Anonim, TR-200 Surface roughness tester", User guide, *Time Technology Europe*, 18-22.
24. TS EN 2005, "Yapıştırıcılar-yapısal olmayan uygulamalar için ahşap yapıştırıcılar-Bindirmeyle yapılandırılmış eklerin çekmeyle kayma mukavemetinin tayini", (2004).
25. Söğütü, C., "Bazı yerli ağaç türlerinin kündeği yapımında kullanım imkânları", *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 46. (2004).
26. Özçiftçi, A., Yapıcı, F., "Effects of machining method and grain orientation on the bonding strength of some wood species", *Journal of Materials Processing Technology*, 202(1): 353-358, (2008).

Bir Üretim Sistemi İçin Üçgenin İç Teğet Çemberinin Merkezi Yardımıyla Bulanık Risk Analizi

Handan AKYAR

Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Matematik Bölümü, 26470 Eskişehir
(Geliş / Received : 19.02.2016 ; Kabul / Accepted : 01.04.2016)

ÖZ

Bulanık sayıların sıralanması ve karşılaştırılması sosyal ve ekonomik sistemler, hava durumu tahmini, optimizasyon ve risk analizi problemleri gibi karar verme problemlerinde önemli bir rol oynar. Bu çalışmada, sol ve sağ yükseklikleri farklı, genelleştirilmiş yamuk bulanık sayıları sıralamak için üçgenin iç teğet çemberinin merkezi ile bulanık sayının sol ve sağ yükseklikleri kullanılarak yeni bir sıralama yöntemi sunulmuştur. Önerilen yöntem kullanılarak bulanık sayıları sıralamak için yeni bir algoritma verilmiştir. Sunulan yöntem literatürdeki mevcut sıralama yöntemlerinin bazı eksikliklerini gidermektedir. Verilen sıralama yöntemi, genelleştirilmiş yamuk ve üçgenel bulanık sayıların yanında aynı ağırlık merkezine sahip genelleştirilmiş üçgenel bulanık sayılar ve gerçel (crisp) sayıları da sıralayabilmektedir. Ayrıca verilen sıralama yönteminin hesaplama değerleri sol ve sağ yükseklikleri farklı, genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılar olan bir üretim sistemi için bulanık risk analizi uygulaması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bulanık risk analizi, Genelleştirilmiş bulanık sayı, Genelleştirilmiş bulanık sayıları sıralama

Fuzzy Risk Analysis Based on the Incenter of a Triangle for a Production System

ABSTRACT

Ordering and ranking fuzzy numbers and their comparisons play a significant role in decision-making problems such as social and economic systems, forecasting, optimization, and risk analysis problems. In this paper, we present a new method for ordering generalized trapezoidal fuzzy numbers with different left and right heights based on the incenter of a triangle with the left and right heights. Using this presented method a new algorithm for ordering fuzzy numbers is given. The proposed method overcomes the certain drawbacks of the existing methods in the literature. The suggested method can order generalized trapezoidal and triangular fuzzy numbers as well as crisp numbers and generalized triangular fuzzy numbers with the same centroid point. We also give an application of the proposed fuzzy ordering method to the fuzzy risk analysis problem for a production system, where the evaluating values are represented by generalized trapezoidal fuzzy numbers with different left and right heights.

Keywords: Fuzzy risk analysis, Generalized fuzzy number, Ranking generalized fuzzy numbers

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bulanık sayıların sıralanması, risk analizi, optimizasyon, sosyal ve ekonomik sistemler, hava durumu tahmini gibi günlük hayatın birçok alanında önemli bir yere sahiptir [1-8]. Bulanık sayıları sıralamak için ilk yöntemin Jain tarafından sunulmasından bu yana, çeşitli yöntemler çok sayıda araştırmacı tarafından önerilmiştir [9-25]. Sunulan bu yöntemlerin çoğu ağırlık merkezi kavramını kullanmaktadır. Ağırlık merkezi kavramının bulanık sayıların sıralanmasında kullanılması ilk olarak Yager tarafından önerilmiştir [10]. Ancak Yager'in yöntemi, ağırlık merkezinin sadece yatay koordinatını dikkate almakta, bu da yöntemin güvenilirliğini düşürmektedir. Murakami vd., Yager'in yöntemini geliştirerek ağırlık merkezinin her iki koordinatını da kullanan bir başka yöntem sunmuştur [11]. Murakami vd. çalışmasında düşey koordinat ek olarak kullanılsa da, farklı üçgenler aynı ağırlık merkezine sahip olabileceğinden, bu yöntem üçgenel bulanık sayıları dahi düzgün sıralayama-

maktadır. Bu problemin üstesinden gelebilmek için, Cheng ağırlık merkezinin her iki koordinatı ile hesaplanan bir uzaklık indeksinin kullanılmasını önermiştir [12]. Fakat Cheng'in yöntemi y -eksenine göre simetrik olan bulanık sayılar için anlamlı olmayan sonuçlar vermektedir. Chen ve Chen yaptıkları çalışmada, yukarıda söz edilen sonuçların bazı eksikliklerini göstermiş ve bu yöntemlerin gerçel sayıları sıralamadığını da ifade etmiştir [1]. Aynı çalışmada Chen ve Chen bu eksikleri ortadan kaldırmak için üçgenin ağırlık merkezi ile birlikte standart sapmayı da dikkate alan bir sıralama yöntemi vermiştir [1].

Lee ve Chen, bulanık sayılar için standart sapmaya bağlı yeni bir sıralama yöntemi önermiştir [14]. Chen ve Chen, genelleştirilmiş bulanık sayıları sıralamak için aritmetik ortalamadan yararlanarak ve standart sapmayı göz önüne alarak bir skor belirlemiştir [15]. Chen vd., çalışmaları sırasında sol ve sağ yükseklikleri farklı, genelleştirilmiş bulanık sayıları sıralamaktadır [18]. Bu yöntemde verilen bir dizi bulanık sayının belirlediği bölge yardımıyla oluşturulan alanların hesaplanması ve ağırlık merkezi yardımıyla elde edilen skor kullanılmaktadır. Bakar ve

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: hakyar@anadolu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 519-530

Gegov, ağırlık merkezi ve bulanık sayıların yayılımını kullanarak bulanık sayıları sıralamak için bir skor vermiştir [21]. Jiang vd., çalışmalarında Chen vd. ile verilen yöntemin eksikliklerini göstermiş ve bu eksiklikleri gidererek bir dizi genelleştirilmiş bulanık sayının belirlediği bölgeler yardımıyla oluşturulan alanların hesaplanması ve bulanık sayıların yayılımına bağlı yeni bir skor vermiştir [24]. Chutia vd., integral değerlerini kullanarak sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş bulanık sayıları sıralamıştır [25]. Düzce, üçgenin dokuz nokta çemberini kullanarak bir başka sıralama yöntemi sunmuştur [23].

Bu çalışmada, bulanık sayıları sıralamak için [5,19] çalışmalarında üçgenin iç teğet çemberi kullanılarak verilen sıralama yöntemlerinin bazı eksiklikleri giderilerek, sol ve sağ yükseklikleri farklı, genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılar için yeni bir sıralama yöntemi verilecektir. Bulanık sayıların sıralanmasında kullanılan yöntemlerin çoğu, gerçel sayı olan bir skor belirleyerek bu skor yardımıyla sıralama yapmaktadır. Ancak bir bulanık sayıya bir gerçel sayı karşılık getirerek sıralama yapmak, çoğu zaman bulanık sayıya ait birçok özelliğin kaybolmasına ve mantığa aykırı sıralama sonuçlarının ortaya çıkmasına yol açmaktadır. Bu nedenle çalışmada sunulan yöntemde sol ve sağ yükseklikleri farklı, genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılara bir gerçel sayı karşılık getirmek yerine, bu sayılara bir sıralı üçlü karşılık getirilerek sözlük sıralama (lexicographical order) kullanılacaktır.

Çalışmanın ikinci bölümünde bulanık sayılar ve temel özellikleri verildikten sonra, bir üçgenin iç teğet çemberi tanımlanacak ve iç teğet çemberin merkezinin koordinatlarını hesaplamak için kullanılacak formüller verilecektir. Üçüncü bölümde ise, sol ve sağ yükseklikleri farklı, genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılar için yeni bir sıralama yöntemi sunulacaktır. Dördüncü bölümde önerilen sıralama yönteminin karşılaştırıldığı bazı sıralama yöntemlerinin hesaplama formülleri kısaca sunulacaktır. Beşinci bölümde sayısal örneklerle verilen yöntemin son yıllarda sunulmuş bazı yöntemlerle karşılaştırılması yapılacaktır. Altıncı bölümde sunulan yöntemin bir üretim sistemi için bulanık risk analizi uygulaması yapılacaktır. Sonuçlar ise yedinci bölümde yer almaktadır.

2. ÖN BİLGİLER (PRELIMINARIES)

2.1. Bulanık Sayılar (Fuzzy Numbers)

Bu bölümde bulanık sayılar ile ilgili sonraki bölümler için gerekli olan bazı temel tanım ve özellikler verilecektir. Bulanık sayılar ile ilgili daha detaylı bilgi için [26,27] incelenebilir.

Bir X kümesi üzerinde \tilde{A} bulanık kümesi, $\tilde{A}:X \rightarrow [0,1]$ fonksiyonu olarak tanımlanır. \tilde{A} fonksiyonu için genellikle $\mu_{\tilde{A}}$ simgesi kullanılır ve \tilde{A} bulanık kümesi her $x \in X$ ögesini $\mu_{\tilde{A}}(x) \in [0,1]$ ile eşleyen $\mu_{\tilde{A}}:X \rightarrow [0,1]$ üyelik fonksiyonu ile karakterize edilir. Burada $\mu_{\tilde{A}}(x)$

değeri $x \in X$ ögesinin \tilde{A} bulanık kümesine ait olma derecesini göstermektedir.

\tilde{A}, X kümesi üzerinde tanımlı bir bulanık küme olsun. Bu durumda

$$S(\tilde{A}) = \{x \in X: \mu_{\tilde{A}}(x) > 0\} \quad (1)$$

kümesine \tilde{A} bulanık kümesinin desteği (support'u) denir.

\tilde{A} bulanık kümesinin yüksekliği ise

$$h(\tilde{A}) = \sup_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) \quad (2)$$

olarak tanımlanır.

$\alpha \in [0,1]$ ve \tilde{A}, X kümesi üzerinde bir bulanık küme olsun. Bu durumda

$$[\tilde{A}]^{\alpha} = \begin{cases} \{x \in X: \mu_{\tilde{A}}(x) \geq \alpha\} & , \alpha \in (0,1] \text{ ise} \\ \text{cl } S(\tilde{A}) & , \alpha = 0 \text{ ise} \end{cases}$$

kümesine \tilde{A} bulanık kümesinin α -kesmesi denir. Burada $\text{cl } S(\tilde{A})$ ile $S(\tilde{A})$ kümesinin kapanışı gösterilmektedir.

\tilde{A} bulanık kümesi \mathbb{R}^n kümesi üzerinde tanımlı olsun. Eğer her $\alpha \in [0,1]$ için $[\tilde{A}]^{\alpha}$ α -kesme kümeleri konveks küme ise \tilde{A} bulanık kümesine konveks bulanık küme denir.

\mathbb{R} üzerinde tanımlı bir \tilde{A} bulanık kümesi, konveks, $0 < h(\tilde{A}) \leq 1$, $\mu_{\tilde{A}}$ üyelik fonksiyonu üst yarı sürekliliği ve $S(\tilde{A})$ destek kümesi sınırlı ise \tilde{A} bulanık kümesine bir genelleştirilmiş bulanık sayı denir.

Uygulamalarda çoğunlukla üçgensel, yamuk, LR-bulanık sayılar gibi özel tipteki bulanık sayılar kullanılmaktadır. Bu çalışmada üçgensel ve yamuk bulanık sayıların bir genellemesi olan sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılar üzerinde durulacaktır.

$a \leq b \leq c \leq d$ ve $\omega_L, \omega_R \in (0,1]$ gerçel sayıları verilsin. \tilde{A} genelleştirilmiş bulanık sayısı aşağıdaki üyelik fonksiyonu yardımı ile karakterize edilebilir:

$$\mu_{\tilde{A}}(\cdot): \mathbb{R} \rightarrow [0,1], \mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \mu_1(x) & , a \leq x \leq b \text{ ise} \\ \mu_2(x) & , b \leq x \leq c \text{ ise} \\ \mu_3(x) & , c \leq x \leq d \text{ ise} \\ 0 & , \text{d.d.} \end{cases}$$

Burada $\mu_1: [a, b] \rightarrow [0, \omega_L]$,

$\mu_2: [b, c] \rightarrow [\min\{\omega_L, \omega_R\}, \max\{\omega_L, \omega_R\}]$ ve

$\mu_3: [c, d] \rightarrow [0, \omega_R]$ sürekli fonksiyonlardır. Ayrıca μ_1

kesin artan, μ_3 kesin azalan fonksiyon ve $\omega_L < \omega_R$ ise

μ_2 kesin artan, $\omega_L > \omega_R$ ise μ_2 kesin azalan fonksiyondur.

Yukarıdaki gibi verilen \tilde{A} bulanık sayısına *sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş bulanık sayı* denir.

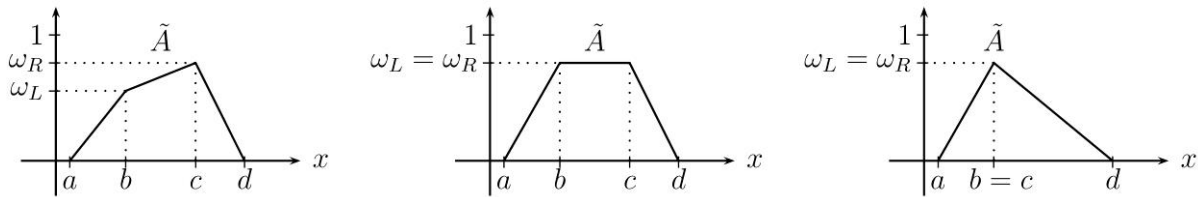
Burada ω_L ve ω_R , \tilde{A} genelleştirilmiş bulanık sayısının sırasıyla sol ve sağ yüksekliklerini göstermektedir.

Eğer μ_1, μ_2 ve μ_3 fonksiyonları lineer ise üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{\omega_L(x-a)}{b-a} & , a \leq x \leq b \text{ ise} \\ \frac{\omega_L(c-b) + (\omega_R - \omega_L)(x-b)}{c-b} & , b \leq x \leq c \text{ ise} \\ \frac{\omega_R(x-d)}{c-d} & , c \leq x \leq d \text{ ise} \\ 0 & , \text{d.d.} \end{cases}$$

Bu durumda \tilde{A} bulanık sayısına *sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayı* denir ve $\tilde{A} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R)$ ile gösterilir.

Eğer $\omega_L = \omega_R$ ise \tilde{A} bulanık sayısına *genelleştirilmiş yamuk bulanık sayı* adı verilir. Ayrıca $b = c$ ise $\omega_L = \omega_R$ olur. Bu durumda \tilde{A} bulanık sayısına *genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayı* denir (bkz Şekil 1).



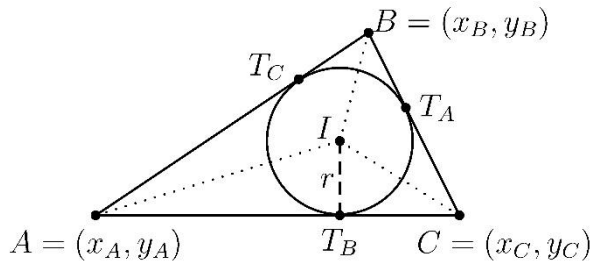
Şekil 1. Sırasıyla sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayı, genelleştirilmiş yamuk bulanık sayı ve genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayı (Generalized trapezoidal fuzzy number with different left and right heights, generalized trapezoidal fuzzy number and generalized triangular fuzzy number respectively)

Bu çalışmada tüm sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılar kümesi \mathbf{F} ile gösterilecektir.

2.2. Bir Üçgenin İç Teğet Çemberi (Incircle of a Triangle)

Bu bölümde bir üçgenin iç teğet çemberi tanımlanarak, iç teğet çemberin merkezinin koordinatları ve yarıçapı ile ilgili gerekli formüller verilecektir.

Teorem 1. ([28]) Bir üçgenin açortay doğruları üçgenin içinde kalan aynı I noktasında kesişir. Bu I noktası üçgenin içinde kalan, üçgenin tüm kenarlarına teğet olan ve iç teğet çember olarak adlandırılan tek çemberin merkezidir.



Şekil 2. ABC üçgeninin iç teğet çemberi, iç teğet çemberinin merkezi I ve yarıçapı r (Incircle of triangle ABC , incenter I and radius r of the incircle)

Teorem 2. (Heron Formülü) Öklid uzayında bir ABC üçgeninin alanı

$$\text{Alan}(ABC) = \sqrt{s(s - |BC|) \cdot (s - |AC|) \cdot (s - |AB|)} \quad (3)$$

formülü ile verilebilir. Burada $s = \frac{|AB| + |BC| + |AC|}{2}$ üçgenin çevresinin yarısıdır.

Aşağıdaki Yardımcı Teorem iç teğet çemberin yarıçapını vermektedir [29].

Yardımcı Teorem 3. Öklid uzayında bir ABC üçgeninin alanı üçgenin iç teğet çemberinin yarıçapı ile üçgenin çevresinin yarısının çarpımına eşittir.

Yardımcı Teorem 3 kullanılarak

$$\text{Alan}(ABC) = rs$$

ya da

$$r = \frac{\text{Alan}(ABC)}{s}$$

yazılabilir. Buradan Teorem 2 kullanılırsa,

$$r = \sqrt{\frac{(s - |BC|) \cdot (s - |AC|) \cdot (s - |AB|)}{s}} \quad (4)$$

formülü elde edilir.

Diğer taraftan, iç teğet çemberin merkezi I , üçgenin üç kenarına da eşit uzaklıkta olduğundan (bkz. Şekil 1) iç teğet çemberin merkezi için bir formül aşağıdaki şekilde verilebilir [30].

Teorem 4. Öklid uzayında bir ABC üçgeninin iç teğet çemberinin merkezi I ,

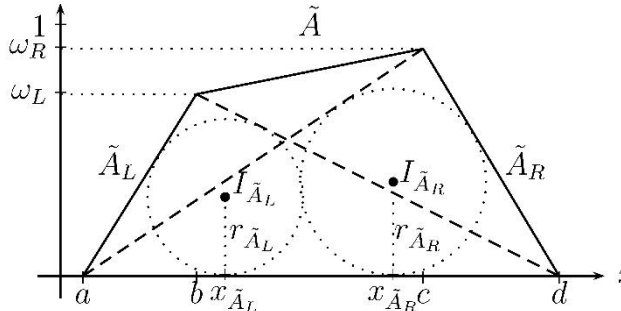
$$I = \frac{|BC| \cdot (x_A, y_A) + |AC| \cdot (x_B, y_B) + |AB| \cdot (x_C, y_C)}{P} \quad (5)$$

eşitliğini sağlar. Burada $P = |BC| + |AC| + |AB|$, ABC üçgeninin çevresinin uzunluğunu göstermektedir.

3. SOL VE SAĞ YÜKSEKLİKLERİ FARKLI GENELLEŞTİRİLMİŞ YAMUK BULANIK SAYILAR İÇİN YENİ BİR SIRALAMA YÖNTEMİ (A NEW METHOD TO ORDER GENERALIZED TRAPEZOIDAL FUZZY NUMBERS WITH DIFFERENT LEFT AND RIGHT HEIGHTS)

Bu bölümde üçgenin iç teğet çemberi kullanılarak sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayıları sıralamak için yeni bir yöntem sunulmuştur. Sunulan yöntem hem gerçel (crisp) sayıları hem de aynı ağırlık merkezine sahip genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayıları da sıralayabildiğinden literatürdeki diğer yöntemlere göre daha kullanışlıdır.

Herhangi bir sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayı $\tilde{A} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R)$ için $\tilde{A}_L = (a, b, b, d; \omega_L, \omega_L)$ ve $\tilde{A}_R = (a, c, c, d; \omega_R, \omega_R)$ şeklinde iki tane genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayı elde edilebilir (bkz. Şekil 3).



Şekil 3. \tilde{A} sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayı ile \tilde{A}_L ve \tilde{A}_R genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayılarıyla iç teğet çemberleri (Generalized trapezoidal fuzzy number \tilde{A} with different left and right heights and generalized triangular fuzzy numbers \tilde{A}_L and \tilde{A}_R with their incircles)

İlk önce $\tilde{A}_L = (a, b, b, d; \omega_L, \omega_L)$ genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayısı göz önünde bulundurulursa köşe noktaları

$A = (x^A, y^A) = (a, 0)$, $B = (x^B, y^B) = (b, \omega_L)$ ve $C = (x^C, y^C) = (d, 0)$ olan ABC üçgeni elde edilir. Buradan

$$\begin{aligned} |BC| &= \sqrt{(b-d)^2 + \omega_L^2}, \\ |AC| &= d-a, \\ |AB| &= \sqrt{(a-b)^2 + \omega_L^2}, \\ P &= |BC| + |AC| + |AB| \end{aligned} \quad (6)$$

bulunur. (4) formülünden

$$r_{\tilde{A}_L} = \frac{\omega_L |AC|}{P} \quad (7)$$

elde edilir. (5) formülünden ise

$$I_{\tilde{A}_L}(x_{\tilde{A}_L}, y_{\tilde{A}_L}) = \frac{|AC| \cdot (b, \omega_L) + |BC| \cdot (a, 0) + |AB| \cdot (d, 0)}{P} \quad (8)$$

olur.

Benzer olarak, $\tilde{A}_R = (a, c, c, d; \omega_R, \omega_R)$ genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayısı için köşe noktaları

$A' = (x_{A'}, y_{A'}) = (a, 0)$, $B' = (x_{B'}, y_{B'}) = (c, \omega_R)$ ve $C' = (x_{C'}, y_{C'}) = (d, 0)$ olan $A'B'C'$ üçgeni için

$$\begin{aligned} |B'C'| &= \sqrt{(c-d)^2 + \omega_R^2}, \\ |A'C'| &= d-a, \\ |A'B'| &= \sqrt{(a-c)^2 + \omega_R^2}, \\ P' &= |B'C'| + |A'C'| + |A'B'| \end{aligned} \quad (9)$$

olur. (4) ve (5) formüllerinden

$$r_{\tilde{A}_R} = \frac{\omega_R |A'C'|}{P'} \quad (10)$$

ve

$$I_{\tilde{A}_R}(x_{\tilde{A}_R}, y_{\tilde{A}_R}) = \frac{|A'C'| \cdot (c, \omega_R) + |B'C'| \cdot (a, 0) + |A'B'| \cdot (d, 0)}{P'} \quad (11)$$

bulunur.

\tilde{A}_L ve \tilde{A}_R bulanık sayılarına karşılık gelen iç teğet çemberler x -eksenine teğettir. Buradan $y_{\tilde{A}_L}$ ve $y_{\tilde{A}_R}$ ordinatları sırasıyla $r_{\tilde{A}_L}$ ve $r_{\tilde{A}_R}$ yarıçaplarına eşit olur. Üstelik $0 < y_{\tilde{A}_L} < \frac{\omega_L}{2}$ ve $0 < y_{\tilde{A}_R} < \frac{\omega_R}{2}$ eşitsizlikleri de geçerlidir (bkz. Şekil 3).

(7)–(11) denklemlerinden, iç teğet çemberlerin merkezleriyle bu çemberlerin yarıçaplarının \tilde{A} bulanık sayısının köşe noktalarının koordinatlarına sürekli bağımlı olduğu kolayca görülebilir. Ayrıca bu çemberlerin merkezlerinin koordinatları \tilde{A} sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayısının, sağa ve sola olan yayılımını da yansıtmaktadır. Bu nedenle, bu tür bulanık sayıları sıralamak için akla iç teğet çemberlerin merkezlerini kullanma fikri gelebilir. Yukarıda verilen gösterimlerle birlikte literatürde sunulan sonuçlarla tutarlı olmak açısından $\tilde{A} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R)$ ve $\tilde{B} = (a', b', c', d'; \omega'_L, \omega'_R)$ sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayıları için (12) deki gibi tanımlı bir “<” sıralama bağıntısı verilebilir:

$$\tilde{A} < \tilde{B} \Leftrightarrow (\omega_R x_{\tilde{A}_R}, \omega_L x_{\tilde{A}_L}, 1 - y_{\tilde{A}_R}) <_L (\omega'_R x_{\tilde{B}_R}, \omega'_L x_{\tilde{B}_L}, 1 - y_{\tilde{B}_R}). \quad (12)$$

Burada $<_L$ simgesi sözlük sıralamayı (lexicographical order) göstermektedir ve

$(x_1, x_2, x_3) <_L (y_1, y_2, y_3) \Leftrightarrow (\exists m = 1, 2, 3)(\forall i < m)(x_i = y_i) \wedge (x_m < y_m)$ şeklinde tanımlanır.

Sıralı üçlüler üzerinde sözlük sıralama bir tam sıralama bağıntısı olduğundan önerilen sıralama yöntemi ile elde edilen sıralama da sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılar kümesi \mathbb{F} üzerinde bir tam sıralama bağıntısı olur.

Önerme 5. $0 < \omega \leq 1$, δ_1 ve δ_2 keyfi pozitif gerçel sayılar olmak üzere, bir genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayısı verilsin. Bu bulanık sayıya karşılık gelen ABC üçgeninin A , B ve C köşe noktalarının koordinatları da sırasıyla $(b - \delta_1, 0)$, (b, ω) ve $(b + \delta_2, 0)$ olsun. Bu durumda

$$\lim_{\delta_1, \delta_2 \rightarrow 0^+} I = (b, 0)$$

olur. Burada I , ABC üçgeninin iç teğet çemberinin merkezini göstermektedir.

Kanıt. Eğer $\delta_1, \delta_2 \rightarrow 0^+$ ise $|BC|, |AB| \rightarrow \omega$ ve $|AC| \rightarrow 0^+$ olur. Denklem (5) de bu ifadeler yerine yazılırsa

$$\begin{aligned} \lim_{\delta_1, \delta_2 \rightarrow 0^+} I &= \lim_{\delta_1, \delta_2 \rightarrow 0^+} \frac{|AC| \cdot (b, \omega) + |BC| \cdot (b - \delta_1, 0) + |AB| \cdot (b + \delta_2, 0)}{|BC| + |AC| + |AB|} \\ &= \frac{\omega(b, 0) + \omega(b, 0)}{2\omega} \\ &= (b, 0) \end{aligned}$$

olur.

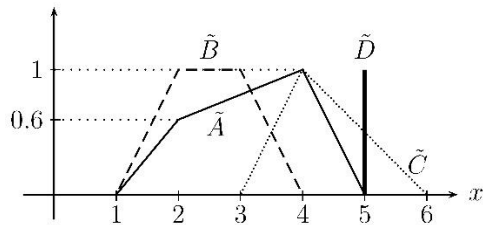
Uyarı 6. Önerme 5 yardımıyla $\tilde{A} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R)$ sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayısı gerçel (crisp) sayı olduğunda yani $a = b = c = d = \rho$ ve $\omega_L = \omega_R = 1$ ise iç teğet çemberin merkezinin koordinatları $x_{\tilde{A}_L} = x_{\tilde{A}_R} = \rho$ ve $y_{\tilde{A}_L} = y_{\tilde{A}_R} = 0$ olarak alınabilir. Buradan \tilde{A} gerçel sayısı için $(\rho, \rho, 1)$ sıralı üçlüsü alınarak (12) ifadesi yardımı ile gerçel sayılar da sıralanabilir.

Herhangi iki \tilde{A} ve \tilde{B} sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayı verildiğinde Algoritma 7 yardımıyla bu bulanık sayılar kolayca sıralanabilir.

Algoritma 7.

1. **Adım:** $\tilde{A} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R)$ ve $\tilde{B} = (a', b', c', d'; \omega'_L, \omega'_R)$ sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayıları gir.
2. **Adım:** Denklem (11) yardımıyla sağ taraftaki üçgenlerin iç teğet çemberlerinin yatay koordinatları $x_{\tilde{A}_R}$ ve $x_{\tilde{B}_R}$ değerlerini hesapla. Eğer $\omega_R x_{\tilde{A}_R} < \omega'_R x_{\tilde{B}_R}$ ise $\tilde{A} < \tilde{B}$ veya $\omega'_R x_{\tilde{B}_R} < \omega_R x_{\tilde{A}_R}$ ise $\tilde{B} < \tilde{A}$ olur ve dur. Aksi halde 3. adıma git.
3. **Adım:** Denklem (8) yardımıyla sol taraftaki üçgenlerin iç teğet çemberlerinin yatay koordinatları $x_{\tilde{A}_L}$ ve $x_{\tilde{B}_L}$ değerlerini hesapla. Eğer $\omega_L x_{\tilde{A}_L} < \omega'_L x_{\tilde{B}_L}$ ise $\tilde{A} < \tilde{B}$ veya $\omega'_L x_{\tilde{B}_L} < \omega_L x_{\tilde{A}_L}$ ise $\tilde{B} < \tilde{A}$ olur ve dur. Aksi halde 4. adıma git.
4. **Adım:** Denklem (11) yardımıyla sağ taraftaki üçgenlerin iç teğet çemberlerinin dikey koordinatları $y_{\tilde{A}_R}$ ve $y_{\tilde{B}_R}$ değerlerini hesapla. Eğer $1 - y_{\tilde{A}_R} < 1 - y_{\tilde{B}_R}$ ise $\tilde{A} < \tilde{B}$ veya $1 - y_{\tilde{B}_R} < 1 - y_{\tilde{A}_R}$ ise $\tilde{B} < \tilde{A}$ olur ve dur. Aksi halde $\tilde{A} \sim \tilde{B}$ olur yani \tilde{A} ve \tilde{B} bulanık sayıları aynıdır.

Eğer sıralanmak üzere verilen bulanık sayılar genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayı ise, bu bulanık sayıya karşılık gelen üçgen ile yukarıdaki gibi tanımlanan sol ve sağ üçgenler aynı olacaktır. Bu durumda Algoritma 7 yine kullanılabilir. Yani verilen algoritma ile genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayılar hatta gerçel sayılar da sıralanabilir.



Şekil 4. Örnek 8 ile verilen $\tilde{A} = (1,2,4,5;0,6,1)$, $\tilde{B} = (1,2,3,4;1,1)$, $\tilde{C} = (3,4,4,6;1,1)$ ve $\tilde{D} = (5,5,5,5;1,1)$ bulanık sayıları (Fuzzy numbers $\tilde{A} = (1,2,4,5;0,6,1)$, $\tilde{B} = (1,2,3,4;1,1)$, $\tilde{C} = (3,4,4,6;1,1)$ and $\tilde{D} = (5,5,5,5;1,1)$ presented in Example 8)

Sunulan yöntemin kolay uygulanabilir ve güvenilir olduğunu gösteren basit bir örnek verelim.

Örnek 8 $\tilde{A} = (1,2,4,5;0,6,1)$, $\tilde{B} = (1,2,3,4;1,1)$, $\tilde{C} = (3,4,4,6;1,1)$ ve $\tilde{D} = (5,5,5,5;1,1)$ bulanık sayıları verilsin (bkz. Şekil 3). Denklem (8), (11) ve Uyarı 6 kullanılarak iç teğet çemberlerin merkezleri

$$\begin{aligned} I_{\tilde{A}_L} &= (2.0534, 0.2918), & I_{\tilde{A}_R} &= (3.8741, 0.4664), \\ I_{\tilde{B}_L} &= (2.0891, 0.4511), & I_{\tilde{B}_R} &= (2.9110, 0.4511), \\ I_{\tilde{C}_L} &= (4.089, 0.4511), & I_{\tilde{C}_R} &= (4.089, 0.4511), \\ I_{\tilde{D}_L} &= (5, 0), & I_{\tilde{D}_R} &= (5, 0) \end{aligned}$$

olarak elde edilir. Bunlar (12) ifadesinde yerine yazılırsa, $(\omega_R x_{\tilde{A}_R}, \omega_L x_{\tilde{A}_L}, 1 - y_{\tilde{A}_R}) = (3.8741, 1.2320, 0.5336)$, $(\omega'_R x_{\tilde{B}_R}, \omega'_L x_{\tilde{B}_L}, 1 - y_{\tilde{B}_R}) = (2.9110, 2.0891, 0.5489)$, $(\omega''_R x_{\tilde{C}_R}, \omega''_L x_{\tilde{C}_L}, 1 - y_{\tilde{C}_R}) = (4.0890, 4.0890, 0.5489)$, $(\omega'''_R x_{\tilde{D}_R}, \omega'''_L x_{\tilde{D}_L}, 1 - y_{\tilde{D}_R}) = (5, 5, 1)$

hesaplanır. Algoritma 7 yardımıyla ya da doğrudan sözlük sıralama ile

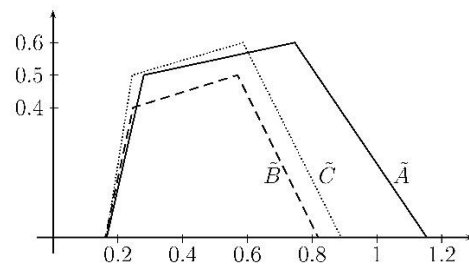
$$(2.9110, 2.0891, 0.5489) < (3.8741, 1.2320, 0.5336) < (4.0890, 4.0890, 0.5489) < (5, 5, 1)$$

olduğundan

$$\tilde{B} < \tilde{A} < \tilde{C} < \tilde{D}$$

bulunur. Elde edilen bu sıralama akla yatkın ve beklenen bir sonuçtur.

Örnek 9



Şekil 5. $\tilde{A} = (0.1659, 0.2803, 0.7463, 1.154; 0.5, 0.6)$, $\tilde{B} = (0.1611, 0.2475, 0.5696, 0.8187; 0.4, 0.5)$, $\tilde{C} = (0.1645, 0.2445, 0.5869, 0.8894; 0.5, 0.6)$

sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş bulanık sayılar (generalized trapezoidal fuzzy numbers with different left and right heights)

Sunulan yöntemi Chutia vd. tarafından verilen yöntem ile karşılaştırmak üzere,

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= (0.1659, 0.2803, 0.7463, 1.154; 0.5, 0.6), \\ \tilde{B} &= (0.1611, 0.2475, 0.5696, 0.8187; 0.4, 0.5), \\ \tilde{C} &= (0.1645, 0.2445, 0.5869, 0.8894; 0.5, 0.6) \end{aligned}$$

sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılarını ele alalım (bkz. Şekil 5, [25]).

Denklem (8) ve (11) kullanılarak verilen bulanık sayılar için sol ve sağ taraftaki üçgenlerin iç teğet çemberlerinin merkezleri aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned} I_{\tilde{A}_L} &= (0.4131, 0.1970), & I_{\tilde{A}_R} &= (0.7146, 0.2326), \\ I_{\tilde{B}_L} &= (0.3458, 0.1491), & I_{\tilde{B}_R} &= (0.5334, 0.1766), \\ I_{\tilde{C}_L} &= (0.3721, 0.1770), & I_{\tilde{C}_R} &= (0.5579, 0.2041). \end{aligned}$$

Hesaplanan bu değerler (12) ifadesinde yerine yazıldığında

$$(\omega_R x_{\tilde{A}_R}, \omega_L x_{\tilde{A}_L}, 1 - y_{\tilde{A}_R}) = (0.4288, 0.2065, 0.7674),$$

$$(\omega'_R x_{\tilde{B}_R}, \omega'_L x_{\tilde{B}_L}, 1 - y_{\tilde{B}_R}) = (0.2667, 0.1383, 0.8234),$$

$$(\omega''_R x_{\tilde{C}_R}, \omega''_L x_{\tilde{C}_L}, 1 - y_{\tilde{C}_R}) = (0.3347, 0.1861, 0.7959)$$

olur. Buradan Algoritma 7 kullanılırsa ya da doğrudan sözlük sıralama kullanılacak olursa

$$(0.2667, 0.1383, 0.8234) <_L (0.3347, 0.1861, 0.7959) <_L$$

elde edilir. O halde

$$\tilde{B} < \tilde{C} < \tilde{A}$$

olur. Bu sıralama sonucu ise [25] ile elde edilen sonuç ile uyumludur.

4. BULANIK SAYILARI SIRALAMA YÖNTEMLERİ (THE EXISTING METHODS FOR RANKING FUZZY NUMBERS)

Bu bölümde, önerilen sıralama yönteminin karşılaştırıldığı, son yıllarda diğer araştırmacılar tarafından verilen sıralama yöntemlerinin hesaplama formülleri kısaca sunularak her bir yöntemin hesaplama karmaşıklığı önerilen yöntemle karşılaştırılmıştır.

Lee & Chen (2008): Bu çalışmada verilen bir dizi \tilde{A}_i bulanık sayısının sıralanması için bu sayılara karşılık gelen çokgenlere ve standart sapmaya bağlı aşağıdaki gibi bir skor verilmiştir (bkz. [14]):

$$\text{Rank}(\tilde{A}_i) = \alpha [\beta R_{iH}(\tilde{A}_i) + (1 - \beta) L_{iH}(\tilde{A}_i)] + (1 - \alpha) [\beta R_{iM}(\tilde{A}_i) + (1 - \beta) L_{iM}(\tilde{A}_i) - \frac{1}{3} (\beta R_{iS}(\tilde{A}_i) + (1 - \beta) L_{iS}(\tilde{A}_i) + T_{iS}(\tilde{A}_i))]$$

Burada $\alpha, \beta \in [0, 1]$, R_{iH} ve L_{iH} ise \tilde{A}_i bulanık sayılarının sırasıyla sağ ve sol yüksekliklerini göstermektedir. Ayrıca R_{iM} ve L_{iM} sayıları da sırasıyla \tilde{A}_i bulanık sayılarının sağ ve sol elemanlarının aritmetik ortalamalarıdır. R_{iS} , \tilde{A}_i bulanık sayılarının sağ elemanlarının standart sapmasını ve T_{iS} ise \tilde{A}_i bulanık sayılarının tüm bileşenlerinin standart sapmasını göstermektedir. Bu yöntemde kullanılan formül, önerilen yönteme göre oldukça karmaşık ve uygulaması kolay değildir.

Chen & Chen (2009): Bu çalışmada da verilen bir dizi \tilde{A}_i bulanık sayısının sıralanması için standart sapma ve aritmetik ortalamadan yararlanılarak aşağıdaki gibi bir skor belirlenmiştir (bkz. [15]):

$$\text{Skor}(\tilde{A}_i) = \frac{x_{\tilde{A}_i} \omega_{\tilde{A}_i}}{1 + \text{STD}_{\tilde{A}_i}}$$

Burada \tilde{A}_i , \tilde{A}_i bulanık sayılarının standardize edilmiş halini, $x_{\tilde{A}_i}$ standardize edilmiş bulanık sayıların bileşenlerinin aritmetik ortalamasını, $\omega_{\tilde{A}_i}$, \tilde{A}_i bulanık sayılarının yüksekliklerini ve $\text{STD}_{\tilde{A}_i}$ ise \tilde{A}_i bulanık sayılarının standart sapmasını göstermektedir. Her bir \tilde{A}_i bulanık sayısına bir gerçel sayı karşılık getirilip bu gerçel sayılar yardımıyla sıralama yapmak kolay olsa da bir bulanık sayıya gerçel sayı karşılık getirmek bu sayıya ait

birçok verinin kaybolmasına yol açacağından uygulamalarda bu tür yöntemlerin kullanılması uygun olmayacaktır.

Chen vd. (2012): Bu çalışmada verilen standardize edilmiş bir dizi bulanık sayının belirlediği bölge yardımıyla oluşturulan çeşitli alanların hesaplanması ve ağırlık merkezi yardımıyla bir skor belirlenmiştir (bkz. [18]):

$$\text{Skor}(\tilde{A}_i) = \frac{M_i - N_i}{M_i + N_i + (1 - |c(\tilde{A}_i)|)}$$

Burada M_i ve N_i sayıları \tilde{A}_i genelleştirilmiş bulanık sayılarının belirlediği bölgenin sırasıyla negatif ve pozitif tarafında kalan alanların toplamı, $c(\tilde{A}_i)$ ise \tilde{A}_i genelleştirilmiş bulanık sayılarının ağırlık merkezini göstermektedir. Bu yöntemde genelleştirilmiş bulanık sayılara karşılık gelen çokgen dikdörtgene tamamlanarak, alt bölgelere ayrılmış ve integral yardımıyla alanlar hesaplanmış, her bir bölge için ağırlık merkezleri bulunmuş ve bunların aritmetik ortalaması alınmıştır. Bu ise çok uzun işlemler gerektirmekte ve uygulamalar için uygun olmayan bir sonuç ortaya çıkartmaktadır.

Bakar & Gegov (2014): Bu çalışmada ağırlık merkezi ve bulanık sayıların yayılımı kullanılarak bulanık sayıları sıralamak için bir indeks değeri verilmiştir (bkz. [21]):

$$\text{CPS}(\tilde{A}) = x_{\tilde{A}}^* y_{\tilde{A}}^* (1 - s_{\tilde{A}})$$

Burada $x_{\tilde{A}}^*$ ve $y_{\tilde{A}}^*$ sırasıyla \tilde{A} bulanık sayısına karşılık gelen çokgenin ağırlık merkezinin yatay ve düşey bileşenlerini, $s_{\tilde{A}}$ ise \tilde{A} bulanık sayısının yayılımını göstermektedir. Bu formül basit gözükse de bir bulanık sayıya bir gerçel sayı karşılık getirerek sıralama yapmak bu bulanık sayıya ait çoğu özelliğın yok olmasına ve kimi zaman hatalı sıralama sonuçlarının ortaya çıkmasına yol açabilmektedir.

Chutia vd. (2015): Bu çalışmada verilen \tilde{A} ve \tilde{B} bulanık sayıları için aşağıdaki şekilde verilen gerçel sayılar yardımıyla bir sıralama önerilmektedir (bkz. [25]):

$$I_{\tilde{A}}^{\tilde{B}}(\tilde{A}) = \frac{ac h_2 + (1 - \alpha) b h_1 + (h_2 - h_1) c}{\alpha h_2 (d - c) + (1 - \alpha) h_1 (a - b) + (h_2 - h_1) (b - c)} \cdot \frac{\Gamma(\frac{1}{p} + 1) \Gamma(\frac{1}{p})}{p \Gamma(\frac{2}{p} + 1)}$$

Burada $\alpha \in [0, 1]$ karar vericinin iyimserlik/kötümserlik derecesi, p pozitif tamsayı, a, b, c, d \tilde{A} bulanık sayısının bileşenleri, h_1 ve h_2 sayıları ise sırasıyla \tilde{A} ve \tilde{B} bulanık sayılarının sol ve sağ yüksekliklerinin minimumları ve Γ ise Euler gama fonksiyonudur. \tilde{A} ve \tilde{B} bulanık sayıları özel tipte sayılar olduğunda bu formül daha basit bir hal olsa da bu formül yardımıyla bir sıralama yapmak kolay değildir.

Jiang vd. (2015): Bu çalışmada standardize edilerek verilmiş bir dizi \tilde{A}_i bulanık sayının belirledikleri bölgeler yardımıyla oluşturulan çeşitli alanların hesaplanması ve

standart sapma yardımıyla bir skor belirlenmiştir (bkz. [24]):

$$\text{Skor}(\tilde{A}_i) = \frac{M_i - N_i}{4 + STD_{\tilde{A}_i}}$$

Burada M_i ve N_i sayıları \tilde{A}_i standardize edilmiş bulanık sayıların belirlediği bölgelerin sırasıyla negatif ve pozitif tarafında kalan alanların toplamını, $STD_{\tilde{A}_i}$ ise \tilde{A}_i sayılarının standart sapmasını göstermektedir. Bu yöntemde de bulanık sayılara karşılık gelen çokgen bir dikdörtgene tamamlanarak, bu dikdörtgen çeşitli alt bölgelere ayrılmakta ve integral yardımıyla bu alanlar hesaplanıp, alanlar toplamı ve \tilde{A}_i sayılarının standart sapması yardımıyla bir skor elde edilmektedir. Bu ise karmaşık işlemler gerektirmekte ve uygulamayı güçleştirmektedir.

Düzce (2015): Bu çalışmada verilen geliştirilmiş bulanık sayıya karşılık gelen $ABCD$ çokgeni üçgenlere parçalanarak her bir üçgenin dokuz nokta çemberinin merkezlerinin koordinatları yardımıyla aşağıdaki gibi bir skor belirlenmiştir (bkz. [23]):

$$\text{Skor}(\tilde{A}) = \begin{cases} \omega x_1 + \frac{\text{Alan}(BCD)}{2}, & \omega = \omega_L \text{ ise} \\ \omega x_2 - \frac{\text{Alan}(ABC)}{2}, & \omega = \omega_R \text{ ise} \end{cases}$$

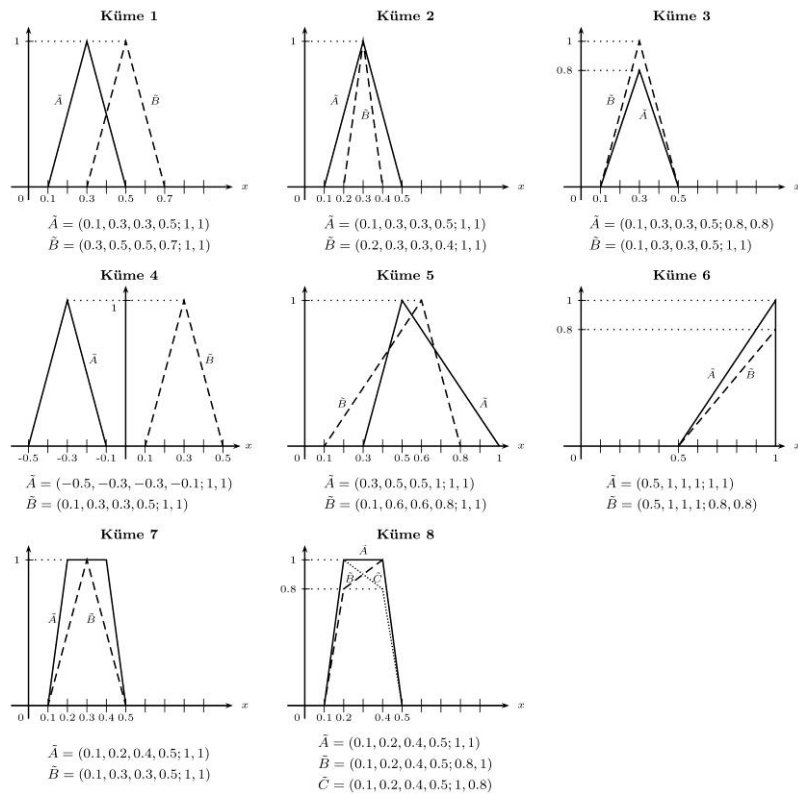
Burada x_1 , ABD üçgeninin dokuz nokta çemberinin merkezini birinci koordinatını, x_2 , ACD üçgeninin dokuz nokta çemberinin merkezini birinci koordinatını göstermektedir ve $\omega = \max\{\omega_L, \omega_R\}$ şeklinde

tanımlanmıştır. Bir üçgenin dokuz nokta çemberinin merkezini koordinatlarının hesaplanması oldukça karmaşık işlemler gerektirmektedir.

Yukarıda sözü edilen tüm yöntemler incelendiğinde tümünde de bulanık sayıya skor olarak adlandırılan bir gerçel sayı karşılık getirilmekte ve sıralama bu gerçel sayılar sıralanarak yapılmaktadır. Oysa bu durum bulanık sayının doğasına aykırıdır. Önerilen yöntemde ise bulanık sayının birçok özelliğini koruyan bir üçlü yardımıyla sıralama yapılmaktadır. Önerilen yöntemde kullanılan ve (12) ile verilen sıralama karmaşık gözükse de bu sıralamada sadece bulanık sayıya karşılık gelen çokgen içerisinde yer alan üçgenlerin iç teğet çemberlerinin merkezlerinin koordinatları kullanılmıştır. Bu koordinatlar (5) ifadesiyle kolayca hesaplanabileceği gibi Matlab, Maple, Mathematica, vb. yazılımlarda iç teğet çemberin merkezini veren hazır komutlar da bulunmaktadır. Bu nedenlerle önerilen yöntemin uygulamalarda kullanılması yukarıda sözü edilen yöntemlere göre daha uygun ve daha kolaydır.

5. SAYISAL ÖRNEKLER (NUMERICAL EXAMPLES)

Bu bölümde, üçüncü bölümdeki geliştirilmiş bulanık sayıları sıralamak için önerilen sıralama yönteminin özellikle son yıllarda diğer araştırmacılar tarafından sunulan sıralama yöntemleriyle bir karşılaştırması verilecektir. Bu amaçla Jiang vd. tarafından kullanılan sekiz farklı bulanık sayı kümesi ele alınmıştır (bkz. Şekil



Şekil 6. Geliştirilmiş bulanık sayı kümeleri (Sets of generalized fuzzy numbers)

6, [24]). Her bir yöntem ile elde edilen karşılaştırmalı sıralama sonucu da Çizelge 1 ile sunulmuştur.

Çizelge 1 incelendiğinde, listelenen her bir yöntemin bazı eksiklikleri olduğu, ancak sunulan yöntemin ise bu eksikleri giderdiği görülmektedir. Her bir küme için elde edilen sonuçlar aşağıda sırayla listelenmiştir.

1. Şekil 6 ile verilen Küme 1, Küme 4 ve Küme 5 te yer alan genelleştirilmiş bulanık sayılar için, listelenen tüm yöntemlerin sunulan yeni yöntemle birlikte aynı sıralama sonucunu verdiği görülmektedir.

2. Küme 2 ile verilen iç içe geçmiş yükseklikleri aynı üçgenel bulanık sayıların belirlediği üçgenlerin ağırlık merkezlerinin koordinatlarının birinci bileşenleri aynı olduğundan Chutia vd. ($\alpha = 0.5$ için), Chen vd. ve Düzce tarafından verilen yöntemler bu bulanık sayıları sıralayamamaktadır. Diğer taraftan, Chutia vd. ($\alpha = 0$ için), Lee ve Chen, Chen ve Chen, Bakar ve Gegov, Jiang vd. tarafından sunulan yöntemler ve önerilen yeni sıralama yöntemi aynı sıralama sonucunu vermektedir. $\alpha = 1$ için Chutia vd. tarafından verilen sıralama yöntemi ise mantığa aykırı sonuç vermektedir.

3. Küme 3 ile verilen genelleştirilmiş üçgenel bulanık sayılar için $\alpha = 0, \alpha = 0.5, \alpha = 1$ iken Chutia vd. tarafından verilen yöntem bu bulanık sayıları sıralayamamakta, bu yöntemin dışında kalan tüm yöntemler ve önerilen yeni yöntem aynı sıralama sonucunu vermektedir.

4. Küme 6 ile verilen iç içe geçmiş boyları farklı dik üçgenlere karşılık gelen genelleştirilmiş üçgenel bulanık sayılar için Chen vd. ve $\alpha = 0, \alpha = 0.5, \alpha = 1$ olduğunda Chutia vd. tarafından sunulan yöntemler bu bulanık sayıları sıralayamamaktadır. Ancak, önerilen yeni yöntemle birlikte diğer tüm yöntemler aynı sıralama sonucunu vermektedir.

5. Küme 7 ile verilen bulanık sayılar Chen vd., Düzce ve $\alpha = 0.5$ için Chutia vd. tarafından önerilen yöntemlerle sıralanamamaktadır. Chen ve Chen, Jiang vd. ve $\alpha = 0$ için Chutia vd. tarafından önerilen yöntem aynı sıralama sonucunu vermektedir. $\alpha = 1$ için Chutia vd., Lee ve Chen, Bakar ve Gegov tarafından verilen yöntemler ile önerilen yeni yöntem beklenen sıralama sonucunu vermektedir.

6. Küme 8 ile verilen sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılar için Chen ve Chen tarafından önerilen yöntem uygulanamaz. Ayrıca, Lee ve Chen ve $\alpha = 0, \alpha = 0.5$ ve $\alpha = 1$ iken Chutia vd. tarafından sunulan yöntemler de bu bulanık sayıları sıralayamamaktadır. Chen vd., Jiang vd. ve Düzce tarafından verilen yöntemler ise aynı sıralama sonucunu vermektedir. Küme 2, Küme 3 ve Küme 6 ile verilen bulanık sayıların diğer yöntemlerle birlikte sıralama sonuçları incelendiğinde yeni sunulan sıralama yönteminin Küme 8 için daha akla yatkın bir sıralama sonucu verdiği görülmektedir.

Çizelge 1. Sunulan yöntemin diğer yöntemlerle karşılaştırması (A comparison of methods)

Yöntem	Küme 1	Küme 2	Küme 3	Küme 4	Küme 5
Lee & Chen (2008)	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$
Chen & Chen (2009)	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$
Chen vd. (2012)	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$
Bakar & Gegov (2014)	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$
Chutia vd. ($\alpha = 0.5$) (2015)	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$
Jiang vd. (2015)	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$
Düzce (2015)	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$
Sunulan Yöntem	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$

Yöntem	Küme 6	Küme 7	Küme 8
Lee & Chen (2008)	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{B}, \tilde{C} < \tilde{A}, \tilde{B} \sim \tilde{C}$
Chen & Chen (2009)	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	–
Chen vd. (2012)	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{C} < \tilde{A} < \tilde{B}$
Bakar & Gegov (2014)	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{A} < \tilde{C} < \tilde{B}$
Chutia vd. ($\alpha = 0.5$) (2015)	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{A} \sim \tilde{B} \sim \tilde{C}$
Jiang vd. (2015)	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{A} < \tilde{B}$	$\tilde{C} < \tilde{A} < \tilde{B}$
Düzce (2015)	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{A} \sim \tilde{B}$	$\tilde{C} < \tilde{A} < \tilde{B}$
Sunulan Yöntem	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{B} < \tilde{A}$	$\tilde{C} < \tilde{B} < \tilde{A}$

Aşağıdaki çizelgede incelenen yöntemler ile sunulan yöntemin kısıtları karşılaştırılmaktadır.

$$= (a + a', b + b', c + c', d + d'; \min(\omega_L, \omega'_L), \min(\omega_R, \omega'_R)).$$

Çizelge 2. Sunulan yöntem ile diğer yöntemlerin kısıtlarının karşılaştırması (The limitations of each method)

Yöntem	Aynı ağırlık merkezine sahip üçgensel bulanık sayıları		
	Ayırt Edici	doğru sıralar	Gerçel (crisp) sayıları sıralar
Lee & Chen (2008)	x	✓	✓
Chen & Chen (2009)	✓	✓	✓
Chen vd. (2012)	x	x	✓
Bakar & Gegov (2014)	✓	✓	✓
Chutia vd. ($\alpha = 0.5$) (2015)	x	x	✓
Jiang vd. (2105)	✓	✓	✓
Düzce (2015)	x	x	✓
Sunulan Yöntem	✓	✓	✓

Çizelge 2’de listelenen yöntemlerin aynı ağırlık merkezine sahip üçgensel bulanık sayıları için kullanılamaması, mantığa aykırı sıralama yapması gibi çeşitli eksiklikleri olmasına karşın, sunulan yöntemin bu eksikliklerin üstesinden geldiği görülmektedir.

6. ÖNERİLEN YÖNTEME DAYALI BİR BULANIK RİSK ANALİZİ UYGULAMASI (AN APPLICATION OF FUZZY RISK ANALYSIS BASED ON THE PROPOSED METHOD)

Bu bölümde sol ve sağ yükseklikleri farklı, genelleştirilmiş yamuk bulanık sayılar için önerilen sıralama yönteminin bir bulanık risk analizi problemine uygulaması yapılacaktır.

$0 \leq a \leq b \leq c \leq d \leq 1$ ve $0 < a' \leq b' \leq c' \leq d' \leq 1$ olmak üzere herhangi $\tilde{A} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R)$ ve $\tilde{B} = (a', b', c', d'; \omega'_L, \omega'_R)$ sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayıları için aritmetik işlemler aşağıdaki gibi tanımlanır:

\oplus : Toplama

$$\tilde{A} \oplus \tilde{B} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R) \oplus (a', b', c', d'; \omega'_L, \omega'_R)$$

\otimes : Çarpma

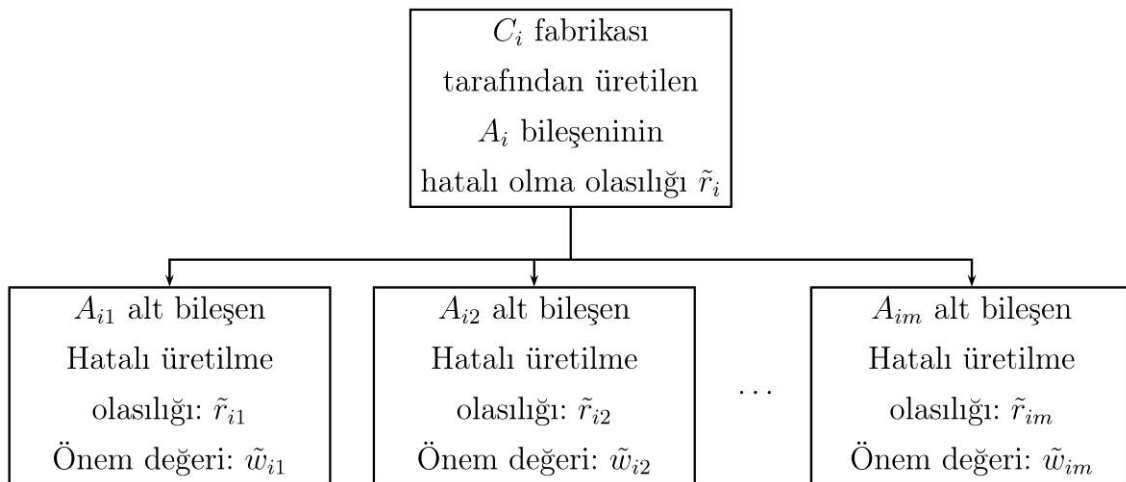
$$\tilde{A} \otimes \tilde{B} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R) \otimes (a', b', c', d'; \omega'_L, \omega'_R) = (a \times a', b \times b', c \times c', d \times d'; \min(\omega_L, \omega'_L), \min(\omega_R, \omega'_R)).$$

\odot : Bölme

$$\tilde{A} \odot \tilde{B} = (a, b, c, d; \omega_L, \omega_R) \odot (a', b', c', d'; \omega'_L, \omega'_R) = (a/d', b/c', c/b', d/a'; \min(\omega_L, \omega'_L), \min(\omega_R, \omega'_R)).$$

Şimdi üretim sistemi için bulanık risk analiz probleminden bahsedelim. C_1, C_2, \dots, C_n şeklinde n tane fabrika verilsin ve C_i fabrikası $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{im}$ şeklinde m farklı bileşenden oluşan A_i ürünü üretsin. Ayrıca A_{ik} , ($1 \leq i \leq n$ ve $1 \leq k \leq m$) bileşenin hatalı üretilme olasılığı \tilde{r}_{ik} ile A_{ik} , bileşenin A_i ürünü içerisindeki önemi de \tilde{w}_{ik} ile gösterilsin. Buna göre C_i fabrikası tarafından üretilen A_i bileşenin hatalı olma olasılığı \tilde{r}_i Algoritma 10 ile kolayca hesaplanabilir.

C_i fabrikası tarafından üretilen A_i bileşenin hatalı olma olasılığı \tilde{r}_i değerini analiz etmek için Şekil 7 ile verilen diyagram kullanılabilir [31].



Şekil 7. Bulanık risk analizi yapısı (The structure for fuzzy risk analysis)

Algoritma 10. ([18])

1. Adım: C_i fabrikası tarafından üretilen her bir A_i bileşeni için hatalı olma olasılığı \tilde{r}_i , A_{ik} alt bileşeni için \tilde{r}_{ik} ve \tilde{w}_{ik} değerleri kullanılarak

$$\begin{aligned} \tilde{r}_i &= (\sum_{k=1}^m \tilde{r}_{ik} \otimes \tilde{w}_{ik}) \odot \sum_{k=1}^m \tilde{w}_{ik} \\ &= (\tilde{r}_{i1}, \tilde{r}_{i2}, \tilde{r}_{i3}, \tilde{r}_{i4}; \omega_{L\tilde{r}_i}, \omega_{R\tilde{r}_i}) \end{aligned} \quad (13)$$

($i = 1, 2, \dots, n$) şeklinde hesaplanır.

2. Adım: Her $\tilde{r}_i = (\tilde{r}_{i1}, \tilde{r}_{i2}, \tilde{r}_{i3}, \tilde{r}_{i4}; \omega_{L\tilde{r}_i}, \omega_{R\tilde{r}_i})$ sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık bulanık sayısı, $k := \max\{\|\tilde{r}_{ij}\|, 1\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ ve $j = 1, 2, 3, 4$ olmak üzere

$$\begin{aligned} \tilde{r}_i^* &= \left(\frac{\tilde{r}_{i1}}{k}, \frac{\tilde{r}_{i2}}{k}, \frac{\tilde{r}_{i3}}{k}, \frac{\tilde{r}_{i4}}{k}; \omega_{L\tilde{r}_i}, \omega_{R\tilde{r}_i} \right) \\ &= (\tilde{r}_{i1}^*, \tilde{r}_{i2}^*, \tilde{r}_{i3}^*, \tilde{r}_{i4}^*; \omega_{L\tilde{r}_i}, \omega_{R\tilde{r}_i}) \end{aligned}$$

şeklinde standardize edilmiş sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık bulanık sayısına dönüştürülür. Burada $\|\tilde{r}_{ij}\|$ simgesi \tilde{r}_{ij} gerçel sayısının mutlak değerinden daha büyük olan en küçük tamsayıyı göstermektedir.

3. Adım: Bölüm 3 te sunulan sıralama yöntemi ile her $i = 1, 2, \dots, n$ için \tilde{r}_i^* sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık bulanık sayıları sıralanır. \tilde{r}_i^* genelleştirilmiş yamuk bulanık bulanık sayısı ne kadar büyükse, C_i fabrikası tarafından üretilen A_i bileşenin hatalı olma olasılığı da o kadar yüksek olur.

Şimdi bulanık risk analizi algoritmasının nasıl uygulandığına dair bir örnek verelim.

Örnek 11. A_1, A_2, A_3, A_4 ve A_5 sırasıyla farklı C_1, C_2, C_3, C_4 ve C_5 fabrikaları tarafından üretilen aynı ürünü

göstersin. Ayrıca, her $i = 1, 2, 3, 4, 5$ için A_i bileşeni A_{i1}, A_{i2} ve A_{i3} şeklinde üç alt bileşenden oluşsun.

C_i fabrikası tarafından üretilen A_{ik} alt bileşeni için \tilde{r}_{ik} ve \tilde{w}_{ik} değerlerinin karşılıkları Çizelge 3 ile verilmiştir. Buradan A_{ik} alt bileşenleri için \tilde{w}_{ik} alt bileşenin önem değeri ve \tilde{r}_{ik} alt bileşenin hatalı üretilme olasılığı kullanılarak C_i fabrikası tarafından üretilen A_i ürününün \tilde{r}_i hatalı olma olasılığı kolayca hesaplanabilir.

Denklem (13) ve Çizelge 3’deki veriler kullanılarak

$$\begin{aligned} \tilde{r}_1 &= (\tilde{r}_{11} \otimes \tilde{w}_{11} \oplus \tilde{r}_{12} \otimes \tilde{w}_{12} \oplus \tilde{r}_{13} \otimes \tilde{w}_{13}) \odot (\tilde{w}_{11} \oplus \tilde{w}_{12} \oplus \tilde{w}_{13}) \\ &= (0.1765, 0.2860, 0.7244, 1.0574; 0.5, 0.6), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{r}_2 &= (\tilde{r}_{21} \otimes \tilde{w}_{21} \oplus \tilde{r}_{22} \otimes \tilde{w}_{22} \oplus \tilde{r}_{23} \otimes \tilde{w}_{23}) \odot (\tilde{w}_{21} \oplus \tilde{w}_{22} \oplus \tilde{w}_{23}) \\ &= (0.3221, 0.4949, 1.1392, 1.6373; 0.4, 0.5), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{r}_3 &= (\tilde{r}_{31}^* \otimes \tilde{w}_{31}^* \oplus \tilde{r}_{32}^* \otimes \tilde{w}_{32}^* \oplus \tilde{r}_{33}^* \otimes \tilde{w}_{33}^*) \odot (\tilde{w}_{31}^* \oplus \tilde{w}_{32}^* \oplus \tilde{w}_{33}^*) \\ &= (0.3659, 0.5134, 1.1189, 1.5984; 0.5, 0.6), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{r}_4 &= (\tilde{r}_{41} \otimes \tilde{w}_{41} \oplus \tilde{r}_{42} \otimes \tilde{w}_{42} \oplus \tilde{r}_{43} \otimes \tilde{w}_{43}) \odot (\tilde{w}_{41} \oplus \tilde{w}_{42} \oplus \tilde{w}_{43}) \\ &= (0.4706, 0.5968, 0.9998, 1.2053; 0.8, 0.7) \end{aligned}$$

ve

$$\begin{aligned} \tilde{r}_5 &= (\tilde{r}_{51} \otimes \tilde{w}_{51} \oplus \tilde{r}_{52} \otimes \tilde{w}_{52} \oplus \tilde{r}_{53} \otimes \tilde{w}_{53}) \odot (\tilde{w}_{51} \oplus \tilde{w}_{52} \oplus \tilde{w}_{53}) \\ &= (0.0172, 0.0545, 0.1933, 0.3616; 0.4, 0.6) \end{aligned}$$

hesaplanır.

Her $i = 1, 2, 3, 4, 5$ ve $j = 1, 2, 3, 4$ için

$k = \max\{\|\tilde{r}_{ij}\|, 1\} = 2$ bulunur. Buradan \tilde{r}_i genelleştirilmiş bulanık bulanık sayıları standardize edilirse

$$\tilde{r}_i^* = (0.0883, 0.1430, 0.3622, 0.5287; 0.5, 0.6),$$

Çizelge. C_i fabrikaları tarafından üretilen A_{ik} alt bileşeni için \tilde{w}_{ik} önem değeri ve \tilde{r}_{ik} hatalı üretilme olasılığı (The probability of failure \tilde{r}_{ik} and severity of loss \tilde{w}_{ik} of the sub-component A_{ik} made by manufactories C_i)

Fabrika	A_{ik}	Önem değeri	Hatalı üretilme olasılığı
C_1	A_{11}	$\tilde{w}_{11} = (0.04, 0.10, 0.18, 0.23; 0.8, 0.9)$	$\tilde{r}_{11} = (0.17, 0.22, 0.36, 0.42; 0.9, 0.9)$
	A_{12}	$\tilde{w}_{12} = (0.58, 0.63, 0.80, 0.86; 0.65, 0.7)$	$\tilde{r}_{12} = (0.32, 0.41, 0.58, 0.65; 0.9, 0.7)$
	A_{13}	$\tilde{w}_{13} = (0, 0, 0, 0; 0.5, 0.6)$	$\tilde{r}_{13} = (0.58, 0.63, 0.80, 0.86; 0.8, 0.9)$
C_2	A_{21}	$\tilde{w}_{21} = (0.04, 0.10, 0.18, 0.23; 0.8, 0.7)$	$\tilde{r}_{21} = (0.93, 0.98, 1, 1; 0.85, 0.8)$
	A_{22}	$\tilde{w}_{22} = (0.58, 0.63, 0.80, 0.86; 1, 0.5)$	$\tilde{r}_{22} = (0.58, 0.63, 0.80, 0.86; 0.9, 0.9)$
	A_{23}	$\tilde{w}_{23} = (0, 0, 0.02, 0.07; 0.4, 0.8)$	$\tilde{r}_{23} = (0.32, 0.41, 0.58, 0.65; 0.7, 0.9)$
C_3	A_{31}	$\tilde{w}_{31} = (0.04, 0.10, 0.18, 0.23; 1, 1)$	$\tilde{r}_{31} = (0.17, 0.22, 0.36, 0.42; 0.95, 0.95)$
	A_{32}	$\tilde{w}_{32} = (0.58, 0.63, 0.80, 0.86; 0.8, 0.8)$	$\tilde{r}_{32} = (0.72, 0.78, 0.92, 0.97; 0.5, 0.6)$
	A_{33}	$\tilde{w}_{33} = (0, 0, 0.02, 0.07; 0.9, 0.7)$	$\tilde{r}_{33} = (0.58, 0.63, 0.80, 0.86; 1, 1)$
C_4	A_{41}	$\tilde{w}_{41} = (0.72, 0.78, 0.92, 0.97; 0.9, 1)$	$\tilde{r}_{41} = (0.93, 0.98, 1, 1; 0.8, 1)$
	A_{42}	$\tilde{w}_{42} = (0.58, 0.63, 0.80, 0.86; 1, 1)$	$\tilde{r}_{42} = (0.72, 0.78, 0.92, 0.97; 0.8, 0.7)$
	A_{43}	$\tilde{w}_{43} = (0.72, 0.78, 0.92, 0.97; 0.9, 0.8)$	$\tilde{r}_{43} = (0.32, 0.41, 0.58, 0.65; 1, 0.9)$
C_5	A_{51}	$\tilde{w}_{51} = (0.32, 0.41, 0.58, 0.65; 0.9, 0.7)$	$\tilde{r}_{51} = (0, 0, 0.02, 0.07; 0.4, 0.8)$
	A_{52}	$\tilde{w}_{52} = (0.04, 0.10, 0.18, 0.23; 1, 0.6)$	$\tilde{r}_{52} = (0.17, 0.22, 0.36, 0.42; 0.7, 0.9)$
	A_{53}	$\tilde{w}_{53} = (0.58, 0.63, 0.80, 0.86; 0.7, 0.6)$	$\tilde{r}_{53} = (0.04, 0.10, 0.18, 0.23; 1, 0.8)$

$$\begin{aligned}\tilde{r}_2^* &= (0.1610, 0.2475, 0.5696, 0.8186; 0.4, 0.5), \\ \tilde{r}_3^* &= (0.1829, 0.2567, 0.5595, 0.7992; 0.5, 0.6), \\ \tilde{r}_4^* &= (0.2353, 0.2984, 0.4999, 0.6027; 0.8, 0.7), \\ \tilde{r}_5^* &= (0.0086, 0.0272, 0.0967, 0.1808; 0.4, 0.6)\end{aligned}$$

olur.

Denklem (8) ve (11) kullanılarak verilen genelleştirilmiş bulanık sayılar için sol ve sağ taraftaki üçgenlerin iç teğet çemberlerinin merkezleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\begin{aligned}I_{\tilde{r}_1^*L} &= (0.2443, 0.1398), & I_{\tilde{r}_1^*R} &= (0.3270, 0.1534), \\ I_{\tilde{r}_2^*L} &= (0.3458, 0.1491), & I_{\tilde{r}_2^*R} &= (0.5334, 0.1766), \\ I_{\tilde{r}_3^*L} &= (0.3749, 0.1657), & I_{\tilde{r}_3^*R} &= (0.5222, 0.1876), \\ I_{\tilde{r}_4^*L} &= (0.3923, 0.1451), & I_{\tilde{r}_4^*R} &= (0.4394, 0.1410), \\ I_{\tilde{r}_5^*L} &= (0.0807, 0.0688), & I_{\tilde{r}_5^*R} &= (0.0950, 0.0746).\end{aligned}$$

Hesaplanan bu değerler (12) ifadesinde yerine yazıldığında

$$(\omega_{R\tilde{r}_1} x_{\tilde{r}_1R}, \omega_{L\tilde{r}_1} x_{\tilde{r}_1L}, 1 - y_{\tilde{r}_1R}) = (0.1962, 0.1221, 0.8466)$$

$$(\omega_{R\tilde{r}_2} x_{\tilde{r}_2R}, \omega_{L\tilde{r}_2} x_{\tilde{r}_2L}, 1 - y_{\tilde{r}_2R}) = (0.2667, 0.1383, 0.8234)$$

$$(\omega_{R\tilde{r}_3} x_{\tilde{r}_3R}, \omega_{L\tilde{r}_3} x_{\tilde{r}_3L}, 1 - y_{\tilde{r}_3R}) = (0.3133, 0.1875, 0.8124)$$

$$(\omega_{R\tilde{r}_4} x_{\tilde{r}_4R}, \omega_{L\tilde{r}_4} x_{\tilde{r}_4L}, 1 - y_{\tilde{r}_4R}) = (0.3076, 0.3138, 0.8590)$$

$$(\omega_{R\tilde{r}_5} x_{\tilde{r}_5R}, \omega_{L\tilde{r}_5} x_{\tilde{r}_5L}, 1 - y_{\tilde{r}_5R}) = (0.0570, 0.0323, 0.9254)$$

bulunur. Buradan Algoritma 7 ya da doğrudan sözlük sıralama kullanılacak olursa

$$(0.0570, 0.0323, 0.9254) <_L (0.1962, 0.1221, 0.8466) <_L (0.3076, 0.3138, 0.8590) <_L (0.3133, 0.1875, 0.8124)$$

olur. O halde

$$\tilde{r}_5^* < \tilde{r}_1^* < \tilde{r}_2^* < \tilde{r}_4^* < \tilde{r}_3^*$$

elde edilir.

Sonuç olarak, C_3 fabrikası tarafından üretilen A_3 bileşenin hatalı üretilme olasılığı en fazladır. Bunu sırasıyla C_4 , C_2 , C_1 ve C_5 fabrikaları takip etmektedir.

7. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk bulanık sayıları sıralamak için, üçgenin iç teğet çemberinin merkezinin koordinatları ile bulanık sayının sol ve sağ yükseklikleri yardımıyla yeni bir sıralama yöntemi verilmiştir. Verilen sıralama yöntemi, genelleştirilmiş yamuk ve genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayıların yanı sıra aynı ağırlık merkezine sahip genelleştirilmiş üçgensel bulanık sayılarla birlikte, gerçel sayıları da sıralayabilmektedir. Sol ve sağ yükseklikleri farklı genelleştirilmiş yamuk

bulanık sayılar için verilen sıralama yönteminin bulanık risk analizi problemine bir uygulaması yapılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonunca kabul edilen 1403F077 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Chen S. J. and Chen S. M., "Fuzzy risk analysis based on the ranking of generalized trapezoidal fuzzy numbers", *Appl. Intell.*, 26: 1–11, (2007).
- [2] Björk K.M., "An analytical solution to a fuzzy economic order quantity problem", *Internat. J. Approx. Reason.*, 50: 485–493, (2009).
- [3] Barajas M. and Agard B., "Improved fuzzy ranking procedure for decision making in product design", *Int. J. Prod. Res.*, 48: 5433–5453, (2010).
- [4] Akyar E., "A fictitious play algorithm for matrix games with fuzzy payoffs", *Abstr. Appl. Anal.*, Volume 2012: 12 pages Article ID 950482, (2012).
- [5] Akyar E., Akyar H. and Düzce S. A., "Fuzzy risk analysis based on a geometric ranking method for generalized trapezoidal fuzzy numbers", *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 25: 209–217, (2013).
- [6] Marszalek A. and Burczynski T., "Modeling and forecasting financial time series with ordered fuzzy candlesticks", *Inform. Sci.*, 273: 144–155, (2014).
- [7] Xie N. and Xin J., "Interval grey numbers based multi-attribute decision making method for supplier selection", *Kybernetes*, 43: 1064–1078, (2014).
- [8] Yue W., Cai Y., Rong Q., Li C. and Ren L., "A hybrid life-cycle and fuzzy-set-pair analyses approach for comprehensively evaluating impacts of industrial wastewater under uncertainty", *J. Clean. Prod.*, 80: 57–68, (2014).
- [9] Jain R., "Decision-making in the presence of fuzzy variables", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 10: 698–703, (1976).
- [10] Yager R. R., "On a general class of fuzzy connectives", *Fuzzy Sets and Systems*, 4: 235–242, (1980).
- [11] Murakami S., Maeda S. and Imamura S., "Fuzzy decision analysis on the development of centralized regional energy control system", pages 363–368, *Pergamon*, (1983).
- [12] Cheng C. H., "A new approach for ranking fuzzy numbers by distance method", *Fuzzy Sets and Systems*, 95: 307–317, (1998).
- [13] Chen S. J. and Chen S. M., "A new method for handling multicriteria fuzzy decision-making problems using FN-IOWA operators", *Cybernet Syst.*, 34: 109–137, (2003).
- [14] Lee L. W. and Chen S. M., "Fuzzy risk analysis based on fuzzy numbers with different shapes and different deviations", *Expert Syst. Appl.*, 34: 2763–2771, (2008).
- [15] Chen S. M. and Chen J. H., "Fuzzy risk analysis

- based on ranking generalized fuzzy numbers with different heights and different spreads”, *Expert Syst. Appl.*, 36(3): 6833–6842, (2009).
- [16] Chen S. M. and Wang C. H., “Fuzzy risk analysis based on ranking fuzzy numbers using α -cuts, belief features and signal/noise ratios”, *Expert Syst. Appl.*, 36: 5576–5581, (2009).
- [17] Chen S. M. and Sanguansat K., “Analyzing fuzzy risk based on a new fuzzy ranking method between generalized fuzzy numbers”, *Expert Syst. Appl.*, 38: 2163–2171, (2011).
- [18] Chen S.M., Munif A., Chen G. S., Liu H. C. and Kuo B. C., “Fuzzy risk analysis based on ranking generalized fuzzy numbers with different left heights and right heights”, *Expert Syst. Appl.*, 39: 6320–6334, (2012).
- [19] Akyar E., Akyar H. and Düzce S. A., “A new method for ranking triangular fuzzy numbers”, *Internat. J. Uncertain. Fuzziness Knowledge-Based Systems*, 20: 729–740, (2012).
- [20] Abbasbandy S., Nuraei R. and Ghanbari M., “Revision of sign distance method for ranking of fuzzy numbers”, *Iran. J. Fuzzy Syst.*, 10: 101–117, (2013).
- [21] Bakar A. S. A. and Gegov A., “Ranking of fuzzy numbers based on centroid point and spread”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 27(3): 1179–1186, (2014).
- [22] Ezzati R., Khezerloo S. and Ziari S., “Application of parametric form for ranking of fuzzy numbers”, *Iran. J. Fuzzy Syst.*, 12: 59–74, (2015).
- [23] Düzce S. A., “A new ranking method for trapezoidal fuzzy numbers and its application to fuzzy risk analysis”, *J. Intell. Fuzzy Syst.*, 28: 1411–1419, (2015).
- [24] Jiang W., Luo Y., Qin X.Y. and Zhan J., “An improved method to rank generalized fuzzy numbers with different left heights and right heights”, *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 28(5): 2343–2355, (2015).
- [25] Chutia R., Gogoi R. and Datta D., “Ranking p -norm generalised fuzzy numbers with different left height and right height using integral values”, *Mathematical Sciences*, 9: 1–9, (2015).
- [26] Lee K. H., “First course on fuzzy theory and applications”, *Springer*, Heidelberg, (2005).
- [27] Bede B., “Mathematics of fuzzy sets and fuzzy logic”, *Springer*, Heidelberg, (2013).
- [28] Baragar A., “A Survey of Classical and Modern Geometries: with computer activities”, *Prentice-Hall*, New Jersey, (2001).
- [29] Nelsen R. B., “Heron’s formula via proofs without words”, *College Mathematics Journal*, 290–292, (2011).
- [30] Ungar A. A., “Barycentric Calculus in Euclidean and Hyperbolic Geometry: A Comparative Introduction”, *World Scientific Publishing Company*, Singapore, (2010).
- [31] Schmucker K. J., “Fuzzy sets, natural language computations, and risk analysis”, *Computer Science Press*, Maryland, (1984).

Kömür Yakıtlı Termik Santrallere Alternatif Petkok Yakıtlı Termik Santraller

Özlem ÖZÇELİK¹, Kurtuluş BORAN*²

¹Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği

(Geliş / Received : 26.02.2016 ; Kabul / Accepted : 08.04.2016)

ÖZ

Petkok, artık sadece petrol rafinerisi yan ürünü değil, yapısındaki yüksek karbon içeriği ve düşük kül oranıyla sebebiyle enerji üretimi için de alternatif yakıt olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ülkemizin ve hatta dünyanın artan enerji talebini karşılamak için fosil kaynakların ömürlerinin azaldığını görmekteyiz. Yapılan çalışmada, kömür ve petkok yakıtlı termik santraller, yatırım maliyetleri, işletme maliyetleri ve yıllık bakım maliyetleri göz önüne alınarak karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: petkok, kömür, enerji

Coal-Fired Power Plants Alternative Petcoke Fired Power Plants

ABSTRACT

Petroleum coke is not by-product of refinery, have been started using alternative fuel for energy production because of high carbon content and low ash rate. Growing energy demand in our country and even the World leads to the depletion of fossil resources life time. In this study, coal and petroleum coke fired thermal power plants are compared considering capital costs, operating costs and annual maintenance costs.

Keywords: petcoke, coal, energy

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Modern toplumların ekonomilerinin ve büyümelerinin temelini oluşturan sanayileşmenin sağladığı yararların yanı sıra çözüm bekleyen birçok problemi beraberinde getirmiştir. Bunlardan en önemlisi enerji talebindeki artıştır. Enerji kullanmadan üretim yapmak mümkün değildir. İstatistiklere göre gelişmiş ülkeler aynı zamanda en çok enerji tüketen ülkelerdir. Gelecek senaryolara baktığımızda önümüzdeki beş yıl içerisinde elektrik talebi %5 ile %10 arasında bir artışa sahip olacaktır [1]. Ortadoğu'da elektrik üretiminin %30'u petrole bağımlıdır [2]. Bu rakam Dünya ile karşılaştırıldığında dört kat daha fazladır. Ülkemizde ise kömür, elektrik üretiminde kullanılan önemli yakıt türlerinden birisidir. Fosil yakıtların hızla tükenmesi ve dolayısıyla maliyetlerin artması, sektörü ve araştırmacıları alternatif yakıt arayışına yönlendirmiştir.

Dünya Ekonomik Görünüm Raporu (WEO 2013) senaryolarına göre elektrik üretiminin, 2011'de 22 113 TWh'den ortalama %2,5'lik artışlarla 2020'de 28 789 TWh'ye, 2030'da 36 224 TWh'ye ve 2035'de de 39 853 TWh'ye artması öngörülmektedir. Bu rakamlar göz önüne alındığında 2011 ve 2035 yılları arasında % 80,2 oranında artış beklenmektedir. Aynı şekilde, ABD Enerji

Bilgi İdaresi olan EIA tarafından 2013 yılında hazırlanan Referans çalışma baz alındığında (IEO 2013) 2010'da 20 200 TWh olan elektrik üretiminin 2020'de 26 600 TWh'ye yükselmesi öngörülmektedir. 2010-2035 döneminde ise yıllık % 2 oranında yükselmelerle toplam % 79,2 oranında artış ile 2035 yılında elektrik üretiminin 36 200 TWh değerine ulaşacağı hesaplanmaktadır. 2035 yılına kadar kömüre dayalı elektrik üretiminin yıllık ortalama % 2,4 oranında ve doğalgaza dayalı elektrik üretiminin ise % 2,7 oranında yükselmesi beklenmektedir [3].

Türkiye'nin büyüme oranlarına ve dolayısıyla artan enerji arzına bakıldığında, elektrik ve doğalgaz talebinde artış olmuştur [3]. Kömürün elektrik üretimindeki payı, 2015 yılsonu itibariyle %30,2, doğalgazın ise % 47,9 olmuştur [4]. Doğalgaz ve kömüre bağımlılık yüksek oranda olduğundan dolayı biyokütle, petkok gibi alternatif yakıtlara yönelme olmaktadır.

Petkok, bıraktığı kül miktarı düşük ve ısı değeri yüksek olan, katı bir yakıttır. Koyu gri veya siyah renklidir. Eritilemez 1500 °C plastik faza geçer. Başlıca bileşeni karbondur, yapısında kükürt, oksijen, azot ve hidrojen de bulundurulur. Bünyesinde karbon oranı yüksek olmasına rağmen emisyon oranları yerli kömüre göre düşük gözükmektedir. Yakıtların kuru bazda elementer ve endüstriyel analizleri aşağıda Çizelge-1'de verilmiştir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: kboran@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 531-535

Çizelge-1. Yakıtların elementer ve endüstriyel analizleri (Fuels' proximate and ultimate analysis)

Parametreler	Petkok	Yerli kömür
Elementer Analiz (kuru bazda)		
Element	%	%
C	81,80	45,20
S	5,50	2,36
N	0,90	1,22
H	3,80	3,46
O	0,59	28,15
Endüstriyel Analiz		
Nem	7,00	24,00
Uçucu Madde	11,00	26,00
Karbon Oranı	81,00	44,39
Kül Oranı	1,00	19,61

Demir-çelik, çimento fabrikaları, depolama, kireçleştirme ve enerji üretiminde etkin olarak kullanılmaktadır. Yapısındaki yüksek karbon oranı nedeniyle enerji üretimi için üstünlüğü bulunmaktadır. Yapısındaki uçucu madde miktarının az olması ve kükürt oranının yüksek olması kendisi gibi katı yakıt olan kömürle kıyaslandığında başlıca farklılıklardır. Yapısındaki uçucu miktarının az olması kömüre oranla yanma için tutuşturma sıcaklığının yüksek olması gerektiği anlamını taşır.

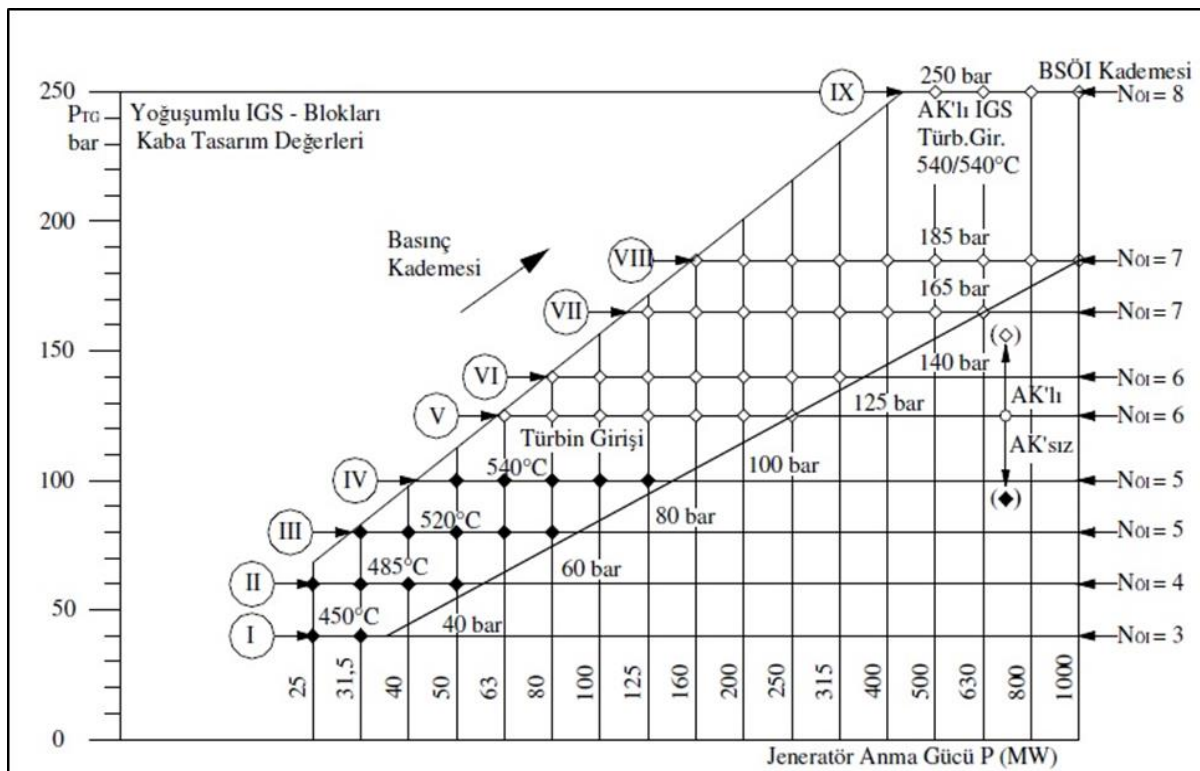
Bu çalışmada, yerli kömür ile petkok yakıtlı termik santrallerin ekonomik yönden karşılaştırılması yapılmıştır.

2. METOT (METHOD)

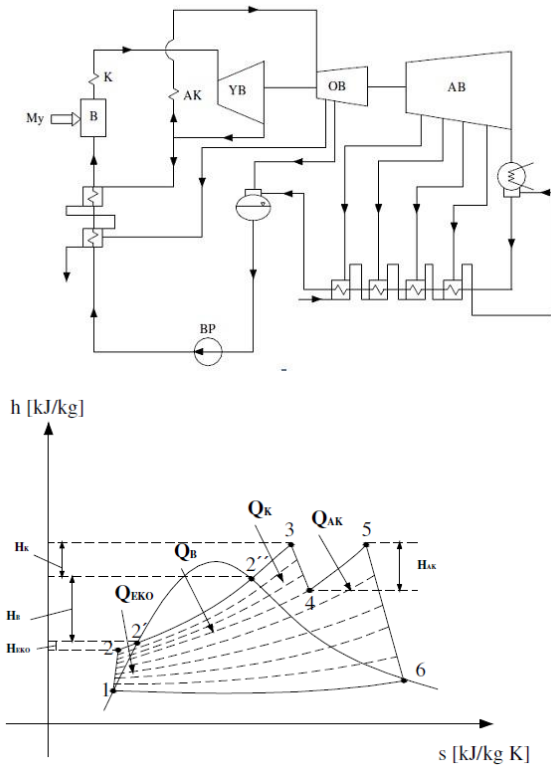
Petkok, karbonlu rafineri koklaştırıcı ünitelerinden veya diğer kırma süreçlerinden elde edilir. Bitümlü kömür veya linyit gibi fosil yakıt olarak kabul edilmesine rağmen, petkokun kimyasal içeriğine bakıldığında çoğunlukla karbondan ibarettir. Bu yakıtın en etkileyici özelliği yüksek ısıl değeri ve çok az oranda kül miktarıdır. Yüksek kükürt içeriğinden dolayı petkok, dolaşımli akışkan yatak (DAY), projelerde şu ana kadar yapılmış olan çok popüler ve rekabetçi bir yakıt haline gelmiştir [5].

Hesabı yapılacak olan termik santralin yapısını belirlerken bütün termodinamik verilere ulaşmamızı sağlayacak Şekil 1’de verilen tasarım abağında faydalanılacaktır. Bu abak üzerinde, kurulması istenen santralin kurulu gücünün, santral yük durumu ile kesleştirilmesiyle, santralin basınç kademesi belirlenecek ve istenilen değerler elde edilebilecektir [6].

Yapılan çalışmada örnek olarak 315 MW kurulu güçte bir santral tasarlanacağı için abağın sekizinci basınç kademesindeki değerden faydalanılarak besleme suyu sıcaklığı; kazan çıkış ve ara kızdırıcı çıkış sıcaklıkları; türbin giriş basıncı; türbin, ara kızdırıcı ve yoğunlaştırucudan geçen buhar-su debileri değerleri Şekil 2’de verilen santral akış diyagramı ve Rankine çevrimi h-s diyagramından elde edilmiştir [6].



Şekil-1. Türbin giriş basıncı ve jeneratör anma gücü diyagramı [6]. (Turbine inlet pressure and generator nominal power)



Şekil-2. Rankine çevrimi h-s diyagramı (Rankine cycle h-s diagram)

$$P_{TB} = 185 \text{ [bar]} \quad T_{BS} = 255 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$P_{KÇ} = 194 \text{ [bar]} \quad T_{TB} = 540 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$P_{AKG} = 45,3 \text{ [bar]} \quad T_{AK} = 540 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$P_{AKÇ} = 40,8 \text{ [bar]}$$

$$\dot{m}_{buh} = 255,465 \text{ [kg/s]} \quad d_{TB^*} = 0,811 \text{ [(kg/s)/MW]}$$

$$\dot{m}_{kız} = 255,465 \text{ [kg/s]} \quad d_{AK^*} = 0,744 \text{ [(kg/s)/MW]}$$

$$\dot{m}_{AK} = 234,36 \text{ [kg/s]} \quad d_{Y^*} = 0,499 \text{ [(kg/s)/MW]}$$

$$\dot{m}_{eko} = 255,465 \text{ [kg/s]}$$

2 noktası için; $h_2 = C_p \cdot T_2 = 1065,9 \text{ kJ/kg}$

2' noktası için; $h_{2'} = C_p \cdot T_{2'} = 1463 \text{ kJ/kg}$

2'' noktası için; $h_{2''} = 2600 \text{ kJ/kg}$

3 noktası için; $h_3 = 3383 \text{ kJ/kg}$

4 noktası için; $h_4 = 3106 \text{ kJ/kg}$

5 noktası için; $h_5 = 536 \text{ kJ/kg}$

$$Q_1 = Q_B, Q_2 = Q_K, Q_3 = Q_{AK}, Q_4 = Q_{EKO}, Q_5 = Q_{HOI}$$

Elde ettiğimiz sonuçlar kullanılarak kazan ısı yükü aşağıdaki şekilde bulunabilir.

$$Q_{buh} = \dot{m}_{buh} \text{ [kg/s]} \cdot (h_{2''} - h_{2'}) \text{ [kJ/kg]} = 290463,705 \text{ kW}$$

$$Q_{kız} = \dot{m}_{kız} \text{ [kg/s]} \cdot (h_3 - h_{2''}) \text{ [kJ/kg]} = 200029,095 \text{ kW}$$

$$Q_{AK} = \dot{m}_{AK} \text{ [kg/s]} \cdot (h_5 - h_4) \text{ [kJ/kg]} = 100774,8 \text{ kW}$$

$$Q_{EKO} = \dot{m}_{eko} \text{ [kg/s]} \cdot (h_2 - h_2) \text{ [kJ/kg]} = 101445,152 \text{ kW}$$

$$Q_{kazan} = Q_{buh} + Q_{kız} + Q_{AK} + Q_{EKO} = 692712,752 \text{ kW}$$

$$= 595625107.50752 \text{ kcal/h}$$

Yakıt Isıl Değerinin Hesaplanması

Bu çalışmada dikkate alınan yakıtın elementer analizi bilindiği için, alt ve üst ısı değerler Dulong formülü ile hesaplanabilir [7].

$$H_{ü} = 8080C + 34500 (H-O/8) + 2240S$$

$$H_a = H_o - 587(W+9H)$$

Dulong formülü kömüre uygulandığında,

$$H_{ü} = 3743 \text{ kcal/kg}$$

$$H_a = 3419 \text{ kcal/kg}$$

Dulong formülü petkoka uygulandığında,

$$H_{ü} = 8018 \text{ kcal/kg}$$

$$H_a = 7776 \text{ kcal/kg}$$

Kazan Yakıt Tüketimi Hesabı

Kazan yakıt tüketiminin hesaplanabilmesi için enerji santralinin çalışma oranının bilinmesi gerekmektedir [7]. Bu çalışmada santrallerin yılda 8000 saat çalıştığı öngörülmüştür.

Literatürdeki verilen santral verimlerinin ortalaması olarak santral verimi % 89,98 kabul edilmiştir.

$$M_y = [Q_{kazan} / (H_a \cdot \eta_k)]$$

Kömür için;

$$M_{y\text{kömür}} = 193,6 \text{ t/h}$$

Petkok için;

$$M_{y\text{petkok}} = 85,1 \text{ t/h}$$

Kömür için yıllık yakıt tüketimi (YYT_{kömür});

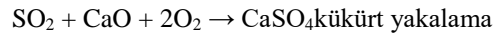
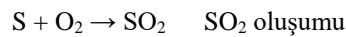
$$(YYT_{\text{kömür}}) = M_{y\text{kömür}} \cdot 8000 = 1548800 \text{ ton}$$

Petkok için yıllık yakıt tüketimi (YYT_{petkok});

$$(YYT_{\text{petkok}}) = M_{y\text{petkok}} \cdot 8000 = 680800 \text{ ton}$$

Finansal analiz için yıllık kireçtaşı miktarı hesaplanmıştır.

Hesaplamalar aşağıdaki formüllerden yapılmıştır.



Kömür için;

$$\text{Kireçtaşı miktarı} = 14,3 \text{ t/h}$$

Petkok için;

$$\text{Kireçtaşı miktarı} = 14,6 \text{ t/h}$$

Buradan yola çıkarak;

1 kg petkok için 165 gr SO₂ oluşur ve bunun sonucunda 170 gr kireçtaşı,

1 kg kömür için 71 gr SO₂ oluşur ve bunun sonucunda 73,89 gr kireçtaşı gerekmektedir.

Bu çalışmada, 315 MW kurulu gücündeki yerli kömür yakıtlı elektrik santrali ile 315 MW kurulu gücündeki petkok yakıtlı termik santraller karşılaştırılmaktadır.

Çizelge-3. Petkok ve kömür yakıtlı santrallerin işletme maliyetlerinin karşılaştırılması (Comparison of petcoke and coal fired power plants operation costs)

	Birim fiyat	Petkok		Kömür			
		Tüketim		Maliyet	Tüketim		Maliyet
	\$	Saatlik	Yıllık (t)	\$	Saatlik	Yıllık (t)	\$
Petkok	70	85,1	678.247	47477290			
Kömür	77				193,6	1.542.992	118810384
Doğalgaz(Nm ³ /sa)	0,285	7500	225.000	64.125	7500	225.000	64.125
Kireçtaşı	30	14,6	116.800	3.504.000	14,3	114.400	3.432.000
Kül atma	0,2	0,851	6808	1361,6	37,965	303719,68	60743,936
Diğer				260.000			260.000
TOPLAM				51.306.777			122.627.253

Ekonomik değerlendirmeye bakılırken yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyetleri ile aşağıda verilen değişken maliyetler karşılaştırılmıştır.

- Kazan Bölümü
- Güç Birimi
- Atık Gaz Arıtma
- Deniz Suyu Sistemi
- Depolama ve Taşıma
- Petkok/kömür depolama
- Petkok/kömür taşıma sistemi (konveyör hattı)
- Kireç / Kireçtaşı / alçıtaşı depolama ve taşıma sistemi
- Uçucu kül ve yatak külü depolama ve taşıma sistemi
- Yardımcı Ekipmanlar
- Soğutma suyu sistemi
- Doğalgaz sistemi
- Ham su ve demi su sistemi
- Yangın önleme ve engelleme sistemleri
- Hava sıkıştırma sistemi
- Atık su arıtma sistemi

Çizelge -2’de Yatırımcı bir şirketin petkok ve kömür yakıtlı santrallerin yatırım maliyetleri karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge - 2. Petkok ve kömür yakıtlı santrallerin yatırım maliyetleri karşılaştırılması (Comparison of petcoke and coal fired power plants investment cost)

Yakıtlar		315 MW DAYpetkok	315 MW DAY yerli kömür
Kazan + Atık gaz arıtma	\$	210 000 000	255 000 000
Güç birimi	\$	90 000 000	90 000 000
Deniz suyu sistemi + yardımcı ekipmanlar	\$	85 000 000	85 000 000
Katı madde depolama ve taşıma sistemi	\$	18 000 000	20 000 000
Saha Hazırlama	\$	64 000 000	64 000 000
Yatırımcı maliyeti	\$	25 000 000	25 000 000
TOPLAM	\$	492 000 000	539 000 000

İşletme maliyetleri olarak adlandırdığımız yıllık yakıt, kireçtaşı, doğalgaz, kül atma vb. gibi maliyetlerin karşılaştırılması Çizelge-3’te verilmiştir.

*Çizelge’de verilen doğalgaz miktarı yardımcı yakıt olarak kullanıldığı için yazılmıştır. Yılda 30 saat doğalgaz kullanımı öngörülmüştür.

Yatırım maliyetini hesaplarken göz önünde bulundurduğumuz ekipmanların yıllık bakım masraflarının karşılaştırılması Çizelge-4’te verilmiştir.

Çizelge-4. Petkok ve kömür yakıtlı santrallerin yıllık bakım maliyetleri karşılaştırılması (Comparison of petcoke and coal fired power plants annual maintenance costs)

Yıllık Bakım Maliyetleri	315 MW DAYpetkok	315 MW DAY yerli kömür
Kazan	\$ 8 000 000,00	\$ 11 000 000,00
Güç birimi	\$ 2 200 000,00	\$ 2 200 000,00
FGD	\$ 250 000,00	\$ 250 000,00
Yardımcı santral sistemleri (BOP)	\$ 1 400 000,00	\$ 1 400 000,00
Katı taşıma sistemleri	\$ 700 000,00	\$ 700 000,00
TOPLAM	\$ 12 550 000,00	\$ 15 550 000,00

3. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, yerli kömürden elektrik üreten santral ile petkok kullanılarak elektrik üreten santral maliyetleri göz önüne alınarak ekonomik anlamda karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sırasında iki yakıtında elementer analizi kullanılarak ısı değerleri hesaplanmış ve yıllık yakıt tüketim miktarları bulunmuştur. Tahmini yatırım maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Petkok yüksek karbon ve dolayısıyla enerji içeriği sebebiyle DAY teknolojisi için ideal bir yakıttır. İçeriğindeki hidrojen ve diğer kimyasalların az olması

yanma reaksiyon hızının aniden artması anlamını taşır. Tanecik yapısının aktif karbon gibi dağılık ve gözenekli olması da ayrıca bir avantajdır. Petkokun organik karakterinde kükürt oranı yüksektir. Yanma reaksiyonu sonucu tüm kükürt içeriği neredeyse tamamen SO₂' ye dönüşür. Yanma sonucunda inorganik kimyasallar ve mineral ihtivasi düşük olduğundan zararlı bileşen oranı düşüktür [2].

Ülkemizin ve dünyanın artan elektrik enerjisi talebi göz önüne alındığında yerli kaynaklarımızın kullanımını azaltmak ve aslında rafineri yan ürünü olan petkoku değerlendirilmenin ülke ekonomisine katkısının olacağı görülmüştür.

Kapsamlı araştırmaların az olmasından kaynaklı yapılabilecek yorumlar sınırlıdır. Ancak petkokun kömüre göre çok daha verimli olduğu ve gelişen teknoloji ile alternatif olacağı öngörülebilir.

4. SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

\dot{m}_{AK}	Ara kızdırıcı buhar debisi
\dot{m}_{buh}	Buharlaştırıcı is akışkanı debisi
\dot{m}_{eko}	Ekonomizer su debisi
$\dot{m}_{kız}$	Kızdırıcı buhar debisi
\dot{m}_B	Buhar debisi
M_y	Yakıt miktarı
Q	Isıl kapasite
AK	Ara kızdırıcı
B	Buharlaştırıcı
EKO	Ekonomizer
HÖİ	Hava ön ısıtıcı

K	Kızdırıcı
YO	Yanma odası
YYT	Yıllık yakıt tüketimi
H _ü	Üst Isıl Değer
H _a	Alt Isıl Değer
DAY	Dolaşım Akışkan Yatak
WEO	Dünya Ekonomik Görünüm Raporu
EIA	ABD Enerji Bilgi İdaresi

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Giglio, R. Petcoketopower-A stratejicenergyoptionfortheMiddle East, *Energetica International*, Ekim 2013.
2. Giglio, R. Petcoke:an alternative fuel, *PEI (power engineering international)*, (05/2013)
3. EÜAŞ (Elektrik Üretim Anonim Şirketi), 2013. Elektrik Üretim Sektör Raporu
4. Dünya ve Ülkemiz Enerji ve Tabii Kaynaklar Görünümü, ETKB, Strateji Geliştirme Başkanlığı, Ocak 2015.
5. Damian Góral, Anna Wylenzek "The efficient coal alternative. Petroleumcoke-fired CFB boilers in Europe" Presented at Coal Gen Europe, Warsaw, Poland.
6. Çürüksulu M., "150 MWe Kurulu Güçteki Düşük Kaliteli Linyitle Çalışan Bir Termik Santral İçin Buhar Kazanı Tasarımı" Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2006).
7. Kıyıkım, C., "Öğütülmüş Linyit ile Çalışan Bir Termik Santral Kazanı Tasarımı ile İlgili Bilgisayar Programı Geliştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara (2003).

Sıcak Presleme Yöntemi ile Üretilmiş Uçucu Kül Takviyeli Bronz Matrisli Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Özellikleri Üzerine Kolemanit Miktarının Etkisi

Hüsamettin KUŞ^{1*}, Duran ALTIPARMAK² Gökhan BAŞAR³

¹İskenderun Teknik Üniversitesi, İskenderun Meslek Yüksekokulu, Otomotiv Programı

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Otomotiv Mühendisliği Bölümü

³İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü

(Geliş / Received : 05.03.2016 ; Kabul / Accepted : 21.04.2016)

ÖZ

Bu çalışmada sıcak presleme yöntemi ile üretilen kütlece % 6 uçucu kül takviyeli bronz matrisli fren balata malzemesinin tribolojik özellikleri üzerine farklı oranlarda (% 0,5-4) ilave edilen kolemanit miktarının etkisi araştırılmıştır. Üretilen balata malzemelerinin sürtünme aşınma deneyleri SAE J661 test standardına göre Chase tipi test cihazında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sertlik, yoğunluk gibi bazı fiziksel özellikler de belirlenmiştir. Aşınma mekanizmasını belirleyebilmek için numunelerin aşınma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) kullanılarak karakterize edilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda bütün balata numunelerinin aşınma direnci ve sürtünme katsayısı değerleri SAE-J661 standart aralığında çıkmıştır. Aşınma direnci açısından en iyi sonucu kolemanit ilavesiz sürtünme malzemesi verirken, sürtünme katsayısı açısından en iyi sonucu % 0,5 kolemanit ilaveli sürtünme malzemesi vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Fren balata malzemesi, Uçucu Kül, Kolemanit, Aşınma mekanizması

The Effect of Colemanite Content on Friction-Wear Properties of the Bronze Based Brake Lining Material Reinforced with Fly Ash Fabricated by the Hot-Pressing Method

ABSTRACT

In this study, the effect of the addition of different ratios of colemanite (0.5-4 %) on tribological properties of bronze based brake lining material containing 6 % fly ash fabricated by hot pressing method were investigated. The friction-wear tests of produced brake lining materials were performed on a Chase type friction tester according to SAE J661 test standard. Furthermore, some of physical properties such as density and hardness were also determined. Wear surface of samples were characterized by using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) to determine the wear mechanism. Wear resistance and friction coefficient values of all the brake lining specimens were found to be in the range specified in SAE-J661 standard. In terms of wear resistance, the best result was found for brake lining material without colemanite addition while 0,5 % colemanite added sample gave the best result in terms of friction coefficient.

Key Words: Brake lining materials, Fly Ash, Colemanite, Wear mechanisms

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Frenler otomobillerdeki en önemli güvenlik ve performans elemanlarından biridir [1]. Hareket enerjisini sürtünme yoluyla ısıya dönüştürerek hareketin durdurulması ya da kontrol altına alınmasını sağlayan sistemlere fren sistemi denir [2].

Fren sisteminin en önemli parçalarından biri ise fren balatasıdır [3]. Fren balata malzemesi taşıtın sahip olduğu kinetik enerjisi sürtünme yoluyla ısı enerjisine dönüştürür. İdeal bir balata malzemesinden; kuru veya ıslak ortamlarda değişken yük, sıcaklık, hız gibi farklı çalışma koşullarında nispeten kararlı ve yüksek bir sürtünme katsayısı göstermesi bunun yanı sıra düşük aşınma oranı, frenleme esnasında düşük ses ve fren diskine zarar vermemesi beklenir [4]. Fren balata malzemesinin sahip olduğu bu özellikler doğrudan taşıtın frenleme ve güvenlik performansını etkiler [5].

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: husamettin.kus@hotmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 537-546

Otomobil fren sistemlerinde yaygın olarak polimer matrisli balata malzemeleri kullanılmaktadır [6]. Bu balata malzemelerinin üretiminde tüm bileşenleri bir arada tutmak amacıyla yaklaşık % 30-% 40 arasında fenolik reçine kullanılır. Ayrıca fenolik reçineyi üretmek ucuz ve kolaydır. Ancak ağır fren koşulları altında sürtünme çifti (balata-disk veya balata-kampana) arasında oluşan yüksek sıcaklık (300-450 °C) balatayı oluşturan bileşenleri bir arada tutan fenolik reçinenin termal bozulmaya uğramasına neden olur. Buna bağlı olarak da balata malzemesinin sürtünme katsayısı değeri hızla düşer [7-9]. Fren etkinlik kaybı olarak adlandırılan bu durum durma mesafesinin artmasına neden olarak taşıt güvenliğini azaltır [10].

Yüksek sürtünme arayüzey sıcaklığında polimer matrisli fren balata malzemelerinin neden olduğu fren etkinlik kaybı probleminin üstesinden gelebilmek için polimer matrisli balata malzemelerine göre daha yüksek aşınma direnci ve sıcaklık karşısında daha kararlı sürtünme katsayısı davranışı gösterebilen sinterlenmiş balata malzemeleri taşıt fren sistemlerin de kullanılabilir [11]. Bu balata malzemeleri metal bir matris (Cu, Demir, Alüminyum veya onların alaşımları) ve sürtünme katsayısını arttırmak için oksitler (Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , Mullit ve Spinel), nitrürler (TiN ve Si_3N_4) ve karbürler (B_4C , SiC , TiC ve VC) gibi metal olmayan bileşikler ile katı yağlayıcıların (Grafit, MoS_2 , vd.) karışımından oluşmaktadır [12]. Ancak bu tip balatalarda matris malzemeyi güçlendirmek için kullanılan takviye elemanlarının nispeten yüksek fiyatları bu balataların ana dezavantajını oluşturmaktadır. Bu nedenle bu tip balatalar termik santrallerde kömürün yakılması sonucunda ortaya çıkan ve depolanması çevre kirliliğinin yanı sıra işletme, enerji üretim kaybı vb. konularda parasal ve teknik sorunlara yol açan uçucu kül partikülleri ile güçlendirilebilir [13]. Uçucu kül günümüzdeki ticari fren balatalarının birçoğunda kullanılmakta olan SiO_2 , Al_2O_3 , $CaSO_4$ ve yanmamış karbon içeren bir karışım olup, düzgün fiziksel ve mühendislik özelliklere sahip ince büyüklükte partiküllerden oluşmaktadır. Ayrıca uçucu kül günümüzdeki fren balatalarında kullanılan malzemelerle karşılaştırıldığında % 2-3 oranında daha düşük özgül ağırlığa sahiptir [1]. Balata üretiminde takviye elemanı olarak atık uçucu kül partiküllerinin kullanımı ile hem üretim maliyetleri düşürülebilecek hem de çevre korunmasına katkı sağlanabilecektir. Literatürde uçucu külün polimer matrisli fren balata malzemelerinde dolgu/takviye elemanı olarak kullanımı ile ilgili çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar uçucu külün kompozit malzemelerin sürtünme-aşınma performansları üzerine olumlu katkılar sağladığını göstermiştir [1,14,15]. Ayrıca son yıllarda uçucu kül takviyeli metal matrisli kompozit malzemelerin sürtünme-aşınma davranışlarını araştıran çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda uçucu kül partikülü ilavesinin matris malzemenin aşınma direncini dikkate değer oranda geliştirdiği ifade edilmiştir [16-18]. Literatürde çeşitli seramik partiküller (Al_2O_3 , SiO_2 , $ZrSiO_3$, SiC) ile

güçlendirilmiş sinterlenmiş balata malzemelerin sürtünme-aşınma özellikleri ile ilgili de çeşitli araştırmacıların yaptıkları çalışmalar bulunmaktadır [19-24]. Ancak literatürde uçucu kül takviyeli sinterlenmiş bronz matrisli balata malzemelerin sürtünme-aşınma özellikleri ile ilgili yeterli çalışma bulunamamıştır. Bu yüzden bu konuda yapılacak çalışma literatürdeki önemli bir eksikliği dolduracaktır.

Kimsayal bileşimi $Ca_2B_6O_{11}.5(H_2O)$ olan kolemanit en önemli bor minerallerinden biridir ve Türkiye dünyadaki en büyük kolemanit rezervlerine sahiptir [25]. Kolemanitin sertliği Mohs

sertlik sınıflandırmasına göre 4-4,5, özgül ağırlığı 2,42 g/cm^3 'tür. [2]. Literatürde polimer matrisli fren balata malzemelerinde üleksit, borik asit, borat gibi çeşitli bor minerallerinin kullanımı ile ilgili çeşitli araştırmacıların yaptıkları çalışmalar bulunmaktadır [25-29]. Bu çalışmalarda borik asit, üleksit ve boraks ilaveli polimer matrisli fren balata numunelerinin daha yüksek ve daha kararlı bir sürtünme katsayısı davranışı gösterdikleri rapor edilmiştir.

Bu çalışmada kütlece % 6 uçucu kül takviyeli bronz matrisli fren balata malzemesine sürtünme-aşınma performansını geliştirmek için kütlece farklı oranlarda (% 0,5-4) kolemanit ilave edilerek yeni fren balata numuneleri üretilmiştir. Üretilen bu numunelerin sürtünme aşınma özellikleri Chase tipi sürtünme aşınma test cihazında incelenerek numunelerin ağırlık kaybı, sürtünme davranışı belirlenmiştir. Ayrıca sürtünme karakteristiğini belirlemek için Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve X-Işını Difraksiyon (XRD) analizleri de yapılmıştır.

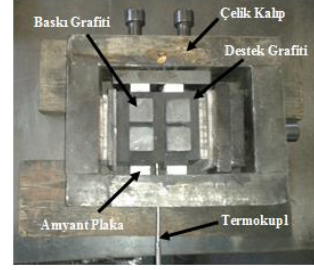
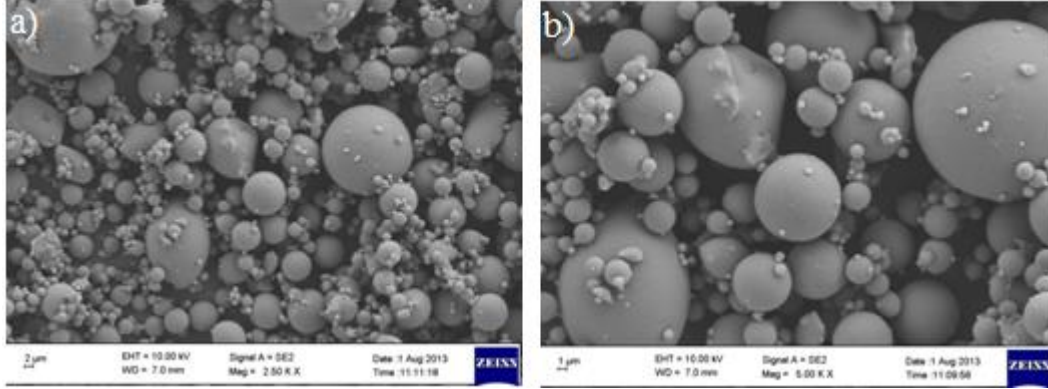
2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL PROCEDURE)

2.1. Numune Üretimi (Production of the sample)

Bu çalışmada bronz matrisli balata malzemesi üretmek için kütlece % 86 bronz tozu ($CuPb10Sn10$), % 11 demir tozu ve % 3 grafit tozu kullanılmıştır. Balata üretiminde kullanılan tozların boyut analizi Çizelge 1'de verilmiştir. Bu matris malzemeye takviye elemanı olarak İskenderun Sugözü Termik Santralinden temin edilen uçucu kül kütlece % 6 oranında ilave edilmiştir. Çalışmada kullanılan uçucu kül partiküllerinin farklı büyütmelerdeki SEM görüntüleri Şekil 1'de, kimyasal analiz sonuçları da Çizelge 2'de verilmiştir. Matris malzeme+% 6 uçucu kül takviyeli bronz matrisli balata malzemesine Çizelge 3'de kimyasal analizi verilen kolemanit kütlece % 0,5, % 1, % 2 ve % 4 oranında ilave edilerek yeni fren balata numuneleri üretilmiştir. Homojen bir toz karışımı elde edebilmek amacıyla balata üretiminde kullanılan tozlar üç boyutlu hareket edebilen Turbula tipi karıştırıcıda 90 dakika boyunca karıştırılmıştır. Fren balata numunesi üretmek için hazırlanan karışım tozları Şekil 2'de verilen 25 mmx25 mmx7 mm boyutlarındaki grafit kalıp içerisinde 650 °C sıcaklık ve 70 MPa basınç altında 4 dakika boyunca sıcak presleme işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 1. Fren balata malzemesi üretiminde kullanılan tozların boyut analizi (Size analyses of the powders used in fabrication of brake lining material)

Partikül	d (0,1)	d (0,5)	d (0,9)
Demir Tozu	36,16 µm	94,08 µm	168,37 µm
Bronz Tozu	35,17 µm	91,87 µm	190,83 µm
Grafit	16,23 µm	88,69 µm	206,53 µm
Uçucu Kül	3,63 µm	19,60 µm	76,25 µm
Kolemanit	3,82 µm	32,19 µm	95,92 µm

**Şekil 2.** Fren balata numunesi üretiminde kullanılan toz presleme kalıbı (Powder pressing die used in the brake pad sample fabrication)**Şekil 1.** Çalışmada kullanılan uçucu külün farklı büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri a) ×2500 b) ×5000 (SEM micrographs representative of the fly ash particles used in this study a) 2500× b) 5000×)**Çizelge 2.** Çalışmada kullanılan uçucu külün kimyasal bileşimi (Chemical constituents of fly ash used in this study)

Bileşik	Kütlece (%)
SiO ₂	62,30
Al ₂ O ₃	20,10
Fe ₂ O ₃	7,93
MgO	1,33
TiO ₂	1,15
Na ₂ O	1,09
K ₂ O	2,03
CaO	2,42

Çizelge 3. Çalışmada kullanılan kolemanitin kimyasal bileşimi (Chemical constituents of colemanite used in this study)

Bileşik	Değer (%)
B ₂ O ₃	40,00±0,5
CaO	27,00±1,00
SiO ₂	4,00-6,50
SO ₄	0,60 Max.
Fe ₂ O ₃	0,08 Max.
Al ₂ O ₃	0,40 Max.
MgO	3,00 Max.
SrO	1,50 Max.
Na ₂ O	0,35 Max.
Kızdırma Kaybı	24,60 Max.
Nem	1 Max.

2.2. Karakterizasyon Testleri (Characterisation tests)

Üretilen fren balata malzemelerinin karakterizasyonu amacıyla sinterleme sonrası yoğunluk ve sertlik değerleri belirlenmiştir. Balata malzemelerinin yoğunlukları Arşimet prensibi ile belirlenmiştir. Balata malzemelerinin sertlik ölçümleri ise Instron Wolpert marka sertlik ölçme cihazında Brinell sertlik ölçme yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Brinell sertlik ölçme yöntemi 2,5 mm bilye çapı ve 31,25 kg kuvvet kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yük numunelere 30 s boyunca uygulanmıştır. Balata malzemelerinden en az beş ölçüm değeri alınmış ve alınan bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır. Balata malzemelerinin aşınma testi sonrası aşınma yüzeylerinde meydana gelen aşınma ve sürtünme mekanizmalarını tespit edebilmek için Zeiss/Supra marka taramalı elektron mikroskopu (SEM) kullanılarak gerekli noktaların fotoğrafları çekilmiş ve EDS analizleri yapılmıştır. Ayrıca fren balata malzemelerinin aşınma yüzeyinde oluşan fazları tanımlamak için Rigaku SmartLab marka cihazda, 5°<2θ<100° tarama aralığında, 40 kV–30 mA ve Cu/K–beta radyasyon ışınıyla 3° mm⁻¹ tarama hızında ve 0,05° tarama adımında X-Işını Difraksiyon (XRD) analizi yapılmıştır.

Performans Testi (Performance test)

Fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma testleri SAE-J661 standardına (Çizelge 4) göre test yapan chase tipi sürtünme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Test cihazı numune tutucusu, disk ve kontrol ünitesi olmak üzere üç ana kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3). Aşındırma

işleminde 250 Hv sertlikte ve 280 mm çapında gri dökme demirden üretilmiş aşındırıcı disk kullanılmıştır. Test cihazında 25 mmx25 mmx7 mm boyutlarına sahip balata numuneleri kullanılmıştır. Her bir parametre için 4 deney numunesi üretilmiş ve bu deney numunelerinden elde edilen sonuçların ortalamaları alınmıştır. Numuneye uygulanan yük pnömatik bir sistem tarafından sağlanmaktadır. Test boyunca kampana sıcaklığı, kampananın dış çevresine yerleştirilmiş rezistanslar ve hava soğutma sistemi tarafından otomatik olarak kontrol edilmektedir. Deney sonuçları aşınma test cihazına bağlı bir bilgisayardan alınmıştır.

Çizelge 5’de görüldüğü gibi kolemanit miktarının artması ile fren balata malzemelerinin yoğunluk değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Kolemanit katkısız fren balata malzemesinin yoğunluğu 6,81 g/cm³ bulunmuştur. Bu malzemeye % 4 kolemanit ilave edildiğinde yoğunluğun yaklaşık % 10 düşüş gösterdiği belirlenmiştir. Bu durumun 650 °C sinterleme sıcaklığında, kolemanitin sahip olduğu kristal suyu kaybederek gözenekli bir yapıya dönüşmesinden ileri geldiği düşünülmüştür. Kolemanit yaklaşık olarak % 22 civarında su ihtiva ettiğinden, numunelerin sinterlemesi esnasında su kaybından dolayı yoğunluklarda azda olsa bir düşüş olabilir. Benzer sonuçlar Boz ve Kurt



Şekil 3. Chase tipi sürtünme aşınma test cihazı (Chase-type friction-wear test machine employed in the testing)

Çizelge 4. SAE J661 test standardına göre sürtünme aşınma deney şartları (Friction-wear test conditions according to SAE J661 test standard)

İşlem Basamakları	Hız (Dev/dak)	Yük(N)	Sürtünme (s)	Bekleme (s)	Uygulama Sayısı	Sıcaklık(°C)		
						Min	Max	Artış
Parlatma	308	450	1200	0	1	-	93	0
Düzenleme	205	230	300	0	1	-	93	0
I. Alıştırma	411	670	10	20	20	82	104	0
I. Yorma	411	670	600	0	1	82	289	28
I.Toparlanma	411	670	10	0	4	261	93	56
Aşınma	411	670	20	10	100	193	205	0
II. Yorma	411	670	600	0	1	82	345	28
II.Toparlanma	411	670	10	0	5	317	93	56
II.Alıştırma	411	670	10	20	20	82	104	0

3. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mekanik Özellikler (Mechanical properties)

% 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarına bağlı olarak değişen yoğunluk ve sertlik değerleri Çizelge 5’de verilmiştir.

tarafından yapılan çalışmada da rapor edilmiştir [22]. Ayrıca artan kolemanit miktarına bağlı olarak yoğunluk düşüşünün diğer bir nedeni olarak da kolemanit tozunun bronz tozuna göre oldukça düşük yoğunluğa sahip olması gösterilebilir.

Çizelge 5. Kolemanit miktarına bağlı yoğunluk ve sertlik değişimi (Variations of density and hardness depending on the colemanite content)

Kolemanit Miktarı (%)	0	0,5	1	2	4
Yoğunluk (g/cm ³)	6,81	6,58	6,46	6,35	6,11
Sertlik (HB)	68	58	61,56	60	54

Çizelge 5 incelendiğinde % 6 uçucu kül takviyeli balata malzemesinin sertlik değerinin 67 HB olduğu belirlenmiştir. Bu malzemeye % 0,5 kolemanit ilave edildiğinde sertlik değerinin 58 HB'ye düştüğü belirlenmiştir. Kolemanit miktarının % 1 olması ile sertlik değerinin hafif bir artış ile 61,56 HB'ye çıktığı ve bu noktadan sonra da artan kolemanit miktarı ile sertlik değerlerinin azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Sertlikteki bu azalmanın nedeni olarak yoğunluk değerlerindeki düşüş gösterilebilir [30].

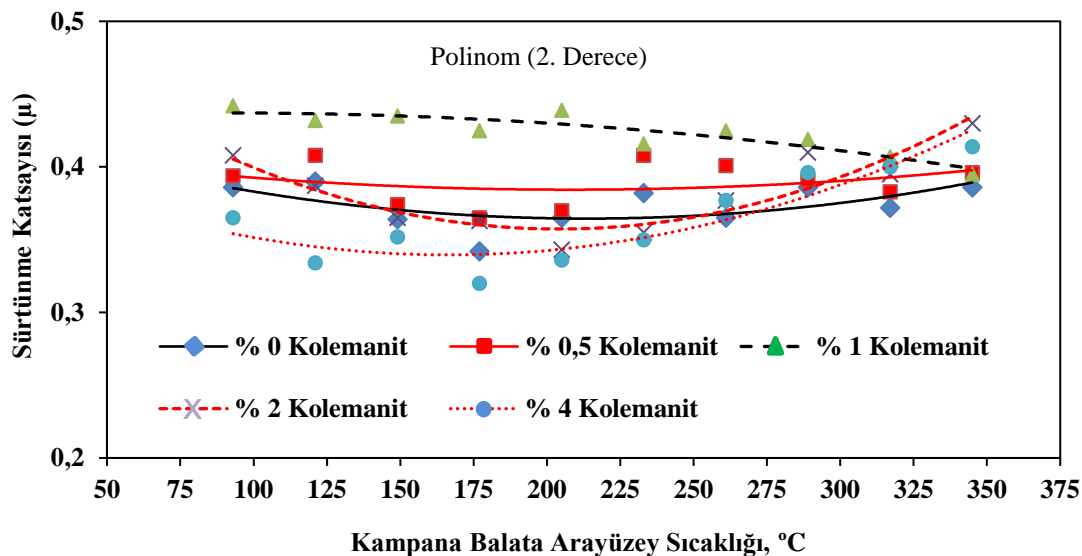
3.2. Sürtünme Performansı (Friction performance)

Fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı, aşınma direnci ve artan sürtünme arayüzey sıcaklığı karşısındaki sürtünme katsayısı kararlılığı önemli ölçüde sürtünme tabakasının doğasına bağlıdır. Sürtünme yüzey filmleri birincil ve ikincil temas platosu olmak üzere iki tür temas platosundan oluşmaktadır [31]. Sürtünme başladığında fren balata malzemesinin aşınmaya karşı dirençli ve mekanik olarak kararlı bileşenlerinin düşük aşınma oranları göstermesi nedeniyle ilk olarak birincil temas platoları oluşmakta ve bu noktalar ikincil temas platolarının büyüebilmesi için çekirdeklenme noktalarını oluşturmaktadır. Sürtünme ara yüzeyinde oluşan normal basınç ve kayma kuvvetinin etkisi ile birincil temas platolarının karşısında biriken aşınma partikülleri sıkıştırılmakta ve sürtünme arayüzeyinde artan sıcaklık etkisiyle sinterlenmektedir. Böylece birincil temas platolarının karşısında ince ikincil temas

platoları oluşmaktadır [32-33]. Dolayısıyla balata sürtünme yüzeyinde oluşan bu farklı karaktere sahip sürtünme filmleri balata malzemelerinin farklı sürtünme davranışı göstermelerinin nedeni olarak düşünülmektedir [34].

Fren balata malzemelerinin frenleme esnasında sürtünmeden dolayı açığa çıkan sıcaklık artışı karşısında oldukça yüksek ve kararlı bir sürtünme katsayısı göstermeleri taşıt güvenliği açısından oldukça hayatidir. Şekil 4 incelendiğinde 95-345 °C sıcaklık aralığında en düşük sürtünme katsayısı değerini (0,365-0,414) % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi verirken en yüksek sürtünme katsayısı değerini (0,442-0,395) ise % 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesi vermiştir.

Fren balata malzemeleri, artan sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı sürtünme katsayısı kararlılığı yönünden değerlendirildiğinde % 0,5 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin oldukça kararlı bir sürtünme katsayısı davranışı gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, % 0,5 kolemanit içeren fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde oluşan temas platolarının varlığı ile açıklanabilir. Benzer şekilde Österle vd., yaptıkları çalışmada fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde, temas platosu olarak adlandırılan oluşumun frenleme esnasındaki sürtünme katsayısı kararlılığı üzerinde önemli bir rol oynadığını rapor etmişlerdir [31]. Ancak % 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin sürtünme katsayısı değerinin 261 °C sıcaklıktan sonra hafif bir düşme eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Artan

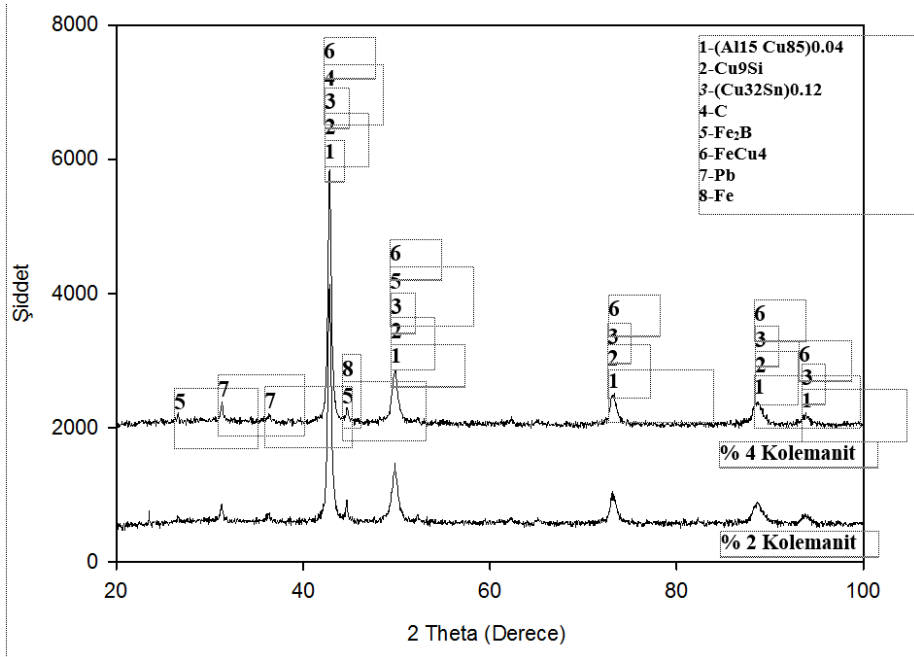


Şekil 4. Fren balata malzemelerinin sıcaklığa bağlı sürtünme katsayısı değişimi üzerine kolemanit miktarının etkisi (Effect of colemanite content on the variations of the temperature-dependent friction coefficients of the brake lining materials)

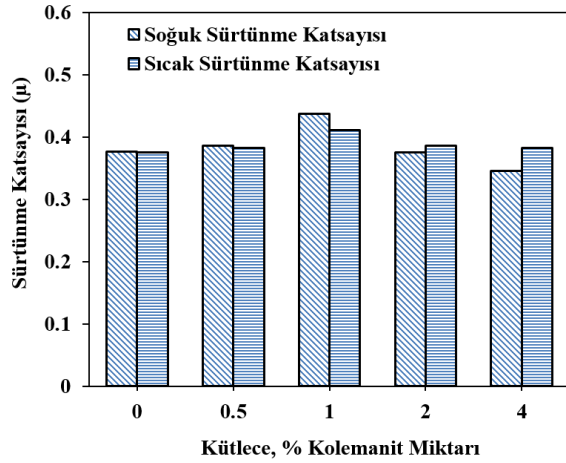
sürtünme arayüzey sıcaklığına bağlı olarak fren etkinliğindeki bu kayıp “fade” olarak adlandırılmaktadır [35]. Yüksek arayüzey sıcaklıklarında sürtünme kuvvetindeki bu düşüşe balata malzemesi ile kampana arasındaki kayma dayanımındaki azalmanın neden olduğu düşünülmektedir. % 1 kolemanit takviyeli fren balata malzemesinin aksine % 2 ve % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısı değerlerinin ise sırası ile 205 °C ve 177 °C sıcaklıktan sonra artan sürtünme arayüzey sıcaklığı ile artış eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Balata içerisindeki kolemanit miktarının % 2 ve % 4 olması ile kolemanitten sağlanan bor elementi ile yapı içerisindeki demir elementi arasında termokimyasal bir süreç meydana gelerek aşınma yüzeyinde Fe₂B gibi sert ve kırılabilir bir demir borür fazının oluştuğu düşünülmektedir. Bu görüşü % 2 ve % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinin XRD analiz sonuçları destekler niteliktedir (Şekil 5). XRD analiz sonuçları ve % 4 kolemanit takviyeli balata malzemesinin Şekil 9.a’daki aşınma yüzey SEM görüntüsü birlikte değerlendirildiğinde Fe₂B fazının oluştuğunu söyleyebiliriz. Mevcut bilgiler ışığında % 2 ve % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin sürtünme katsayısındaki bu artış eğiliminin sürtünme yüzeyinde oluşan kırılabilir Fe₂B fazının sürtünme esnasında kırılarak sürtünme çifti arasındaki temas alanını arttırmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Benzer şekilde Kim vd., yaptıkları çalışmada sürtünme esnasında düşük kırılma tokluğuna sahip abrasif partiküllerin sürtünme arayüzeyinde kırılıp parçalanabileceklerini ve buna bağlı olarak da sürtünme çifti arasındaki temas alanının artması ile sürtünme katsayısının artış gösterebileceğini ifade etmişlerdir [36].

Balata malzemesinin fren diski ile beraber çalışması esnasında sürtünme etkisi ile arayüzey sıcaklığı sürekli artış gösterir. Bu sıcaklığın etkisiyle balata malzemesinin yapısı ve sergilediği tribolojik özellikler de değişmektedir [37]. Bu çalışmada, balataların sürtünme-aşınma test sonuçlarına göre belirli bir sıcaklığın üzerinde ölçülen sürtünme katsayıları sıcak, altındakiler de soğuk olarak isimlendirilmiştir. Buna göre II. yorma testi esnasında 93°C, 121°C, 149 °C, 205 °C sıcaklıklarda elde edilen sürtünme katsayılarının ortalamasına soğuk sürtünme katsayısı, I. toparlanma (149, 205 °C), II. yorma (345, 317, 289, 261, 233 °C) ve II. toparlanma (261, 205, 149 °C) testleri esnasında belirtilen sıcaklıklarda elde edilen sürtünme katsayılarının ortalaması da sıcak sürtünme katsayısı olarak isimlendirilmiştir. Şekil 6’da % 6 uçucu kül takviyeli fren balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarına bağlı olarak değişen sıcak ve soğuk sürtünme katsayısı değerleri görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi kolemanit miktarının % 0,5’den % 1’e artması ile soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının arttığı ancak bu orandan sonra artan kolemanit miktarı ile soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarının azaldığı belirlenmiştir.

En düşük soğuk sürtünme katsayısı değeri (0,346) % 4 kolemanit katkıli fren balata malzemesinde belirlenirken en yüksek soğuk sürtünme katsayısı değeri (0,437) % 1 kolemanit katkıli fren balata malzemesinde belirlenmiştir. En düşük sıcak sürtünme katsayısı değeri (0,375) kolemanit katkısiz fren balata malzemesinde belirlenirken en yüksek sıcak sürtünme katsayısı değeri (0,411) % 1 kolemanit katkıli fren balata malzemesinde belirlenmiştir. Ayrıca % 2 ve % 4 kolemanit katkıli fren balata malzemelerinde sıcak sürtünme katsayılarının



Şekil 5. % 2 ve % 4 kolemanit takviyeli fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinin XRD analizi (XRD analysis of the worn surfaces of 2 wt. % and 4 wt. % colemanite reinforced brake lining materials)

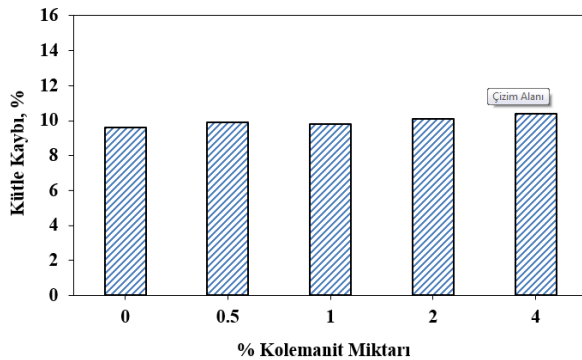


Şekil 6. Fren balata malzemelerinin soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değişimi üzerine kolemanit miktarının etkisi (Effect of colemanite content on the variations of the cold and hot friction coefficients of the brake lining materials)

soğuk sürtünme katsayılarından daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

3.3. Aşınma Oranı (Wear rate)

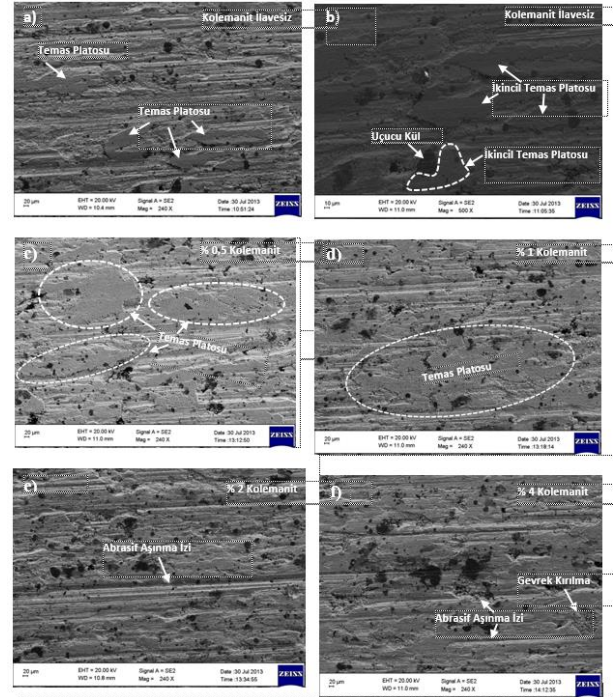
Bir fren sisteminde yer alan balata malzemesinin sergilediği sürtünme katsayısı değişimi, frenleme performansını değerlendirmek için yeterli değildir. Sürtünme katsayısı çok yüksek olsa bile ömrü az olan bir balatanın, maliyeti ve değiştirme süreleri önemli bir dezavantaj oluşturur. Bu bakımdan balata ömrünü belirleyen aşınma oranı da en az sürtünme katsayısı kadar önemli ve gereklidir [37]. Bu çalışmada kolemanit içermeyen fren balata malzemesinin kütle kaybı % 9,6 bulunmuştur (Şekil 7). Bu balata malzemesine % 0,5 kolemanit ilave edildiğinde kütle kaybının hafif bir artış ile % 9,9'a yükseldiği belirlenmiştir. Kolemanit miktarının % 1 olması ile kütle kaybının % 9,8'e düştüğü görülmüştür. Bu noktadan sonra kolemanit miktarının % 2 ve % 4'e artması ile kütle kayıplarının sırası ile % 10,1 ve 10,4'e yükseldiği belirlenmiştir.



Şekil 7. Kolemanit miktarına bağlı kütle kaybı değişimi (Variations of mass loss depending on colemanite content)

3.4. Aşınma yüzeyi analizi (Analysis of the worn surface)

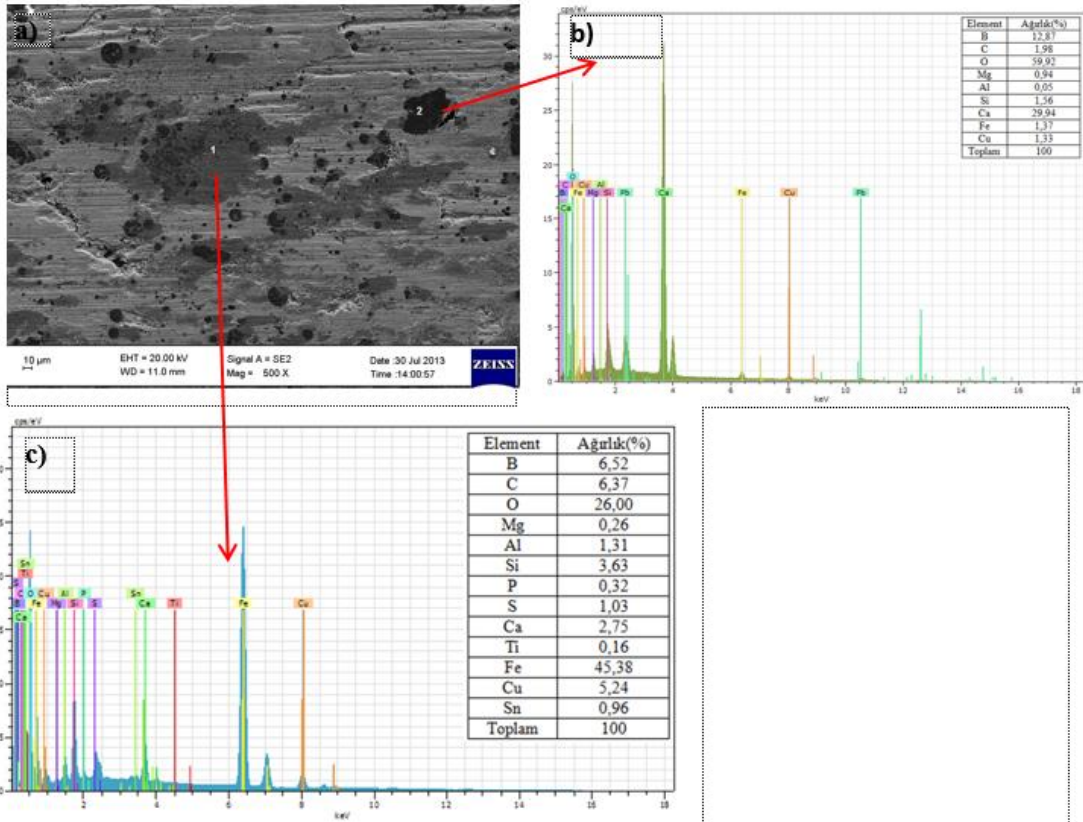
Farklı oranlarda kolemanit katkılı balata malzemelerinin SAE J661 test standardına göre yapılan sürtünme-aşınma deneyleri sonrası aşınma yüzeylerinde meydana gelen değişimlerin SEM fotoğrafları Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8. Farklı oranlarda kolemanit içeren fren balata malzemelerin aşınma yüzeylerinin SEM resimleri a) % 0 ($\times 240$); b) % 0 ($\times 500$); c) % 0,5 ($\times 240$); d) % 1 ($\times 240$); e) % 2 ($\times 240$) f) % 4 ($\times 240$) (SEM micrographs of the worn surfaces of the brake lining materials containing colemanite of different ratios a) 0 % (240 \times); b) 0 % (500 \times); c) 0,5 % (240 \times) d) 1 % (240 \times); e) 2 % (240 \times) f) 4 % (240 \times))

Kolemanit takviyesiz fren balata malzemesinin aşınma yüzeyinde sürtünme esnasında kopan aşınma partiküllerinin aşınmaya karşı daha dirençli bileşen etrafında (uçucu kül partikülleri) temas basıncı ve sürtünme yüzeyinde artan ısı etkisi ile mekanik aşınma işlemine maruz kalarak temas platolarına dönüştüğü belirlenmiştir (Şekil 8.a-b). Literatürde temas platolarının oluşumu ile ilgili yapılan çalışmalarda benzer bulgulara ulaşılmıştır [35, 36]. Fren balata malzemesine % 0,5 ve % 1 kolemanit ilave edildiğinde aşınma yüzeyinde oluşan temas platolarının daha da büyüdüğü belirlenmiştir (Şekil 8.c-d). % 0,5 ve % 1 kolemanit katkılı fren balata malzemelerinin aşınma yüzeylerinde oluşan bu temas platolarının balata malzemelerini aşınmaya karşı koruduğu ve ayrıca sürtünme katsayısı kararlılığına da katkı sağladığı düşünülmektedir. Österle ve Urban yaptıkları çalışmada sürtünme katsayısının kararlılığı üzerine benzer tespitler bulunmuşlardır [31]. % 2 ve % 4 kolemanit katkılı fren balata malzemelerinin aşınma yüzeyleri incelendiğinde yüzeylerde fren balata malzemelerini aşınmaya karşı

koruyacak yeterli temas platolarının oluşmadığı ve diğer balata numunelerine göre daha derin abrasif aşınma izlerinin oluştuğu görülmektedir (Şekil 8.e-f). Aşınma yüzeyinde oluşan bu aşınma izlerinin muhtemelen aşınma yüzeyinde oluşan sert ve kırılğan Fe₂B fazının sürtünme esnasında kırılarak aşınma yüzeyinde kesme türü bir aşınma mekanizması oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 9.a'da verilen % 4 kolemanit ilaveli fren balata malzemesinin aşınma yüzeyi incelendiğinde 1 rakamı ile gösterilen noktanın ağırlıkça % 45,38 oranında demir ve ağırlıkça % 6,52 oranında bor elementi içerdiği 2 rakamı ile gösterilen noktanın ise % 59,92 oksijen, 29,94 kalsiyum, % 12,87 bor ve düşük miktarda karbon, magnezyum, alüminyum, silisyum, demir ve bakır elementleri içerdiği tespit edilmiştir (Şekil 9.b-c). 1 noktasında tespit edilen demir ve bor elementinin varlığı bu noktada Fe₂B fazının oluştuğunun bir göstergesi olarak düşünülebilir. 2 rakamı ile gösterilen noktanın EDS analiz sonucu da bu noktadaki fazın kolemanit partikülü olduğunu göstermektedir.

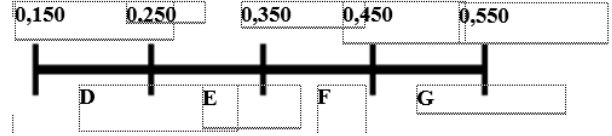


Şekil 9. % 4 kolemanit katkılı fren balata numunesinin aşınma yüzeyinin a) SEM resmi (×500) b) 1 numara ile gösterilen noktadan alınan c) 2 numara ile gösterilen noktadan alınan EDS analiz sonucu (Worn surface of brake lining material containing 4 % colemanite a) SEM micrograph (500×) a) EDS elemental analysis result taken from the point labeled 1 b) EDS elemental analysis result taken from the point labeled 2)

3.5. Değerlendirme

Şekil 10'da SAE-J661 test standardına göre, test edilen numunelerin soğuk ve sıcak sürtünme katsayılarına karşılık gelen harf değerleri görülmektedir. Bu skalada fren ve debriyaj balataları için sürtünme katsayısı

değerleri 0,150-0,550 arasında değerler kabul edilmiş ve her bir balata malzemesinin soğuk ve sıcak sürtünme katsayısı değerleri skalada belirtilen sürtünme katsayısı aralığına karşılık gelen harf değeri ile kodlanmıştır.



Şekil 10. SAE-J661 test standardına göre sürtünme katsayılarına karşılık gelen harf değerleri (The letter equivalents of friction coefficient values according to the SAE-J661 test standard)

Balata imalatçıları skalada DD koduna karşılık gelen ve 0,150-0,250 aralığında sürtünme katsayısı değerlerine sahip balataların debriyaj balataları ve ağır iş makinelerinin fren balataları için uygun olduğunu ancak binek türü araçların fren balatalarından beklenen performans yönünden ihtiyaçlara cevap veremediklerini

Çizelge 6. SAE-J661 test standardına göre balata malzemelerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin harf karşılığı (The letter equivalents of frictional coefficient values obtained from brake lining materials according to the SAE-J661 test standard)

Numune kodu	Skalada okunan değer
Ana Malzeme	FF
Ana Malzeme+% 0,5 Kolemanit	FF
Ana Malzeme+% 1 Kolemanit	FF
Ana Malzeme+% 2 Kolemanit	FF
Ana Malzeme+% 4 Kolemanit	EF

3. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Yapılan bu çalışmada değişik oranlarda kolemanit tozu ilave edilerek sıcak presleme yöntemi ile bronz esaslı balata üretilmiş ve üretilen balataların sürtünme-aşınma özellikleri incelenerek aşağıdaki sonuçlar tespit edilmiştir.

- 1) Balata malzemesine ilave edilen kolemanit miktarındaki artışa bağlı olarak sinterleme yoğunluğunun düştüğü görülmüştür.
- 2) Sürtünme ile ara yüzey sıcaklığının artmasına bağlı olarak en az değişim gösteren sürtünme katsayımı % 0,5 kolemanit ilave edilmiş balata malzemesi vermiştir. En yüksek aşınma % 4 kolemanit ilave edilmiş malzemede olurken, en düşük aşınmanın kolemanit ilavesiz balata malzemesinde olduğu tespit edilmiştir.
- 3) SAE-J661 standardına göre üretilen bütün numunelerin otomobil fren sistemlerinde balata malzemesi olarak kullanılabilirliği belirlenmiştir.
- 4) Termik santrallerden atık bir ürün olarak elde edilen uçucu külün ve ülkemizin önemli bir yeraltı zenginliği olan kolemanitin bronz matrisli balata malzemelerinde fiyat artışına neden olmaksızın rahatlıkla takviye elemanı olarak kullanılabilirliği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Yazarlar 07/2010-28 kodlu proje kapsamında çalışmaya destek veren Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimine teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- 1) Mohanty, S. and Chugh, P., Y., "Development of fly ash-based automotive brake lining", *Tribology International*, 40: 1217-1224, (2007)
- 2) Sugözü, İ., "Bor Katkılı Asbetsiz Otomotiv Fren Balatası Üretimi ve Frenleme Karakteristiğinin İncelenmesi", *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2009)
- 3) Mutlu, İ., "Seramik katkılı asbetsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel

- incelenmesi", *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2002)
- 4) Jaafar, R., T., Selamat, S., M. and Kasiran, R., "Selection of Best Formulation for Semi-Metallic Brake Friction Materials Development", *Powder Metallurgy*, *InTech*, (2012)
- 5) Han, Y., Tian, X. and Yin, Y., "Effects of Ceramic Fiber on the Friction Performance of Automotive Brake Lining Materials", *Tribology Transactions*, 51(6): 779-783, (2008)
- 6) Bijwe, J., "Composites as Friction Materials: Recent Developments in Non-Asbestos Fiber Reinforced Friction Materials-A Review", *Polymer Composites*, 18(3): 378-396, (1997)
- 7) Jang, H., Ko, K., Kim, J. S. and Basch, H. R., "The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials", *Wear*, 256(3-4): 406-414, (2004)
- 8) Bijwe, J., Majumdar, N. N. and Satapathy, K. B., "Influence of modified phenolic resins on the fade and recovery behavior of friction materials", *Wear*, 259(7-12): 1068-1078, (2005)
- 9) Eriksson, M., Bergman, F. and Jacobson, S., "On the nature of tribological contact in automotive brakes", *Wear*, 252(1-2): 26-36, (2002)
- 10) Anderson, E. A., "Friction and Wear of Automotive Brakes", *Friction Lubrication and Wear Technology*, *ASM Handbook*, (1992)
- 11) Junior, E. L. A. J., Arrieche, E. F. and Schaeffer, L., "Analysis of Wear in Organic and Sintered Friction Materials Used in Small Wind Energy Converters", *Materials Research*, 11(3): 269-273, (2008)
- 12) Popescu, N.I., Ghita, C., Bratu, V. and Navarro, P.G., "Tribological behaviour and statistical experiential desing of sintered iron-copper based composites", *Applied Surface Science*, 285: 72-85, (2013)
- 13) Yazıcı, H., "Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi", *Doktora Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2004)
- 14) Malhotra, M. V., Valimbe, S. P. and Wright, A. M., "Effects of fly ash and bottom ash on the frictional behavior of composites", *Fuel*, 81(2): 235-244, (2002)
- 15) Dadkar, N., Tomar, S. B., and Satapathy, K. B., "Evaluation of flyash-filled and aramid fibre reinforced hybrid polymer matrix composites (PMC) for friction braking applications", *Materials and Desing*, 30(10): 4369-4376, (2009)
- 16) Rohatgi, P.K., Guo, R.Q., Huang, P. and Ray, S., "Friction and abrasion resistance of cast aluminum alloy-fly ash composite", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28(1): 245-250, (1997)
- 17) Sudarshan and Surappa, M.K., "Dry sliding wear of fly ash particle reinforced A356 Al composites", *Wear*, 265: 349-360, (2008)
- 18) Sai, N.V., Komaraiah, M. and Raju, A.V.S.R., "Preparation and properties of sintered copper-tin composites containing copper coated or uncoated fly ash", *Materials and Manufacturing Processes*, 23(7): 651-657, (2008)
- 19) Boz, M., and Kurt, A., "The effect of Al₂O₃ on the friction performance of automotive brake friction materials", *Tribology International*, 40(7): 1161-1169, (2007)
- 20) Boz, M., Kurt, A., "The Effect of SiO₂ on the Friction Performance of Automotive Brake Friction", *Metallofiz. Noveshie Tekhnology*, 33(3): 389-405, (2011)

- 21) Boz, M. and Kurt, A., "Effect of ZrSiO₄ on the Friction Performance of Automotive Brake Friction Materials", *J. Mater. Sci. Technol.*, 23(6): 843-850, (2007)
- 22) Boz, M. and Kurt, A., "Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Özelliklerine Sepiyolit'in Etkisi", *Politeknik Dergisi*, 9(4): 303-310, (2006)
- 23) Junior, E. L. A. J., Arrieche, E. F., and Schaeffer, L., "Analysis of Wear in Organic and Sintered Friction Materials Used in Small Wind Energy Converters", *Materials Research*, 11(3): 269-273, (2008)
- 24) Yao, P., Sheng, H., Xiong, X. and Huang, B., "Worn surface characteristics of Cu-based powder metallurgy brake materials for aircraft", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17(1): 99-10, (2007)
- 25) Celik, A.G., Depci, T. and Kılıc, A.M., "New lightweight colemanite-added perlite brick and comparison of its physicomechanical properties with other commercial lightweight materials", *Construction and Building Materials*, 62: 59-66, (2014)
- 26) Sugözü, I., Mutlu, I. and Keskin, A., "Friction and wear behaviour of ulexite and cashew in automotive brake pads", *Materials and Technology*, 49(5): 751-758, (2015)
- 27) Sugözü, İ., Can, İ. and Öner, C., "Investigation of using Calabrian pine cone dust and borax in brake pads", *Industrial Lubrication and Tribology*, 6(6): 678-684, (2014)
- 28) Mutlu, I., Oner, C., Cevik, I. and Findik, F., "Wear performance of some phenolic composites with boric acid", *Industrial Lubrication and Tribology*, 59(1): 38-45, (2007)
- 29) Mutlu, I., Oner, C. and Findik, F., "Boric acid effect in phenolic composites on tribological properties in brake linings", *Materials and Design*, 28(2): 480-487, (2007)
- 30) Vijaya Sai, N., Komaraiah, M. and Sita Ramu Raju, A.V., "Preparation and properties of sintered copper-tin composites containing copper coated or uncoated fly ash", *Materials and Manufacturing Processes*, 23(7): 651-657, (2008)
- 31) Österle, W. and Urban, I., "Third Body formation on brake pads and rotors", *Tribology International*, 39: 401-408, (2006)
- 32) Eriksson, M. and Jacobson, S., "Tribological surface of organic brake pads", *Tribology International*, 33(12): 817-827, (2000)
- 33) Ostermeyer, P., G., "Friction and wear of brake systems", *Forschung im Ingenieurwesen*, 66(6): 267-272, (2001)
- 34) Wirth, A., Whitaker, R., Turner, S. and Fixter, G., "An energy dispersive x-ray and imaging x-ray photoelectronic spectroscopical study of transfer film chemistry and its influence on friction coefficient", *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 68: 675-683, (1994)
- 35) Hee, W., K., and Filip, P., "Performance of ceramic enhanced phenolic matrix brake lining materials for automotive brake linings", *Wear*, 259(7-12): 1088-1096, (2005)
- 36) Kim, S. S., Hwang, H. J., Shin, M. W., Jang, H., "Friction and vibration of automotive brake pads containing different abrasive particles", *Wear*, 271: 1194-1202, (2011)
- 37) Ertan, R., ve Yavuz, N., "Balata Malzemelerinde Kullanılan Yapısalarda Balatanın Tribolojik ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi", *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1): 169-177, (2010)
- 38) Boz, M. ve Kurt, A., "Antimon Trisülfid'in Bronz Esaslı Fren Balata Malzemelerinin Sürtünme-Aşınma Özelliklerine Etkisi", *Teknoloji*, 2(9): 79-90, (2006)

Isı Tekerleği Performansının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Belirlenmesi

Adnan SÖZEN, Erdem ÇİFTÇİ*

Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Ankara, TÜRKİYE

(Geliş / Received : 06.03.2016 ; Kabul / Accepted : 10.03.2016)

ÖZ

Isı tekerleği paralel ve karşı akışlı akım düzenine sahip, iş akışkanı olarak havanın kullanıldığı bir ısı değiştiricisidir. Bu ısı değiştiricisi ısı geri kazanımı ve/veya nem alma işlemleri için kullanılır. Sahip oldukları çok sayıda mikro kanal sayesinde çok hızlı ve kısa sürede gerçekleşen ısı transferine olanak sağlamaları, bu cihazlara üstün bir özellik sağlamaktadır. Bu çalışmada ısı tekerleğinin ısı geri kazanımı amacıyla kullanılması durumunda sağlayacağı performans, sayısal olarak belirlenmiştir. Sayısal analizde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı kullanılarak ısı tekerleğinden elde edilen verimin zamana bağlı olarak değişimi belirlenmiştir. Hesaplamaların yapıldığı ANSYS Fluent yazılımı ile konuma göre değişen sıcaklık dağılımları grafiksel olarak gösterilmiştir. Elde edilen veriler literatürdeki benzer deneysel ve teorik çalışma sonuçları ile kıyaslanmış ve bu sonuçlarla uygunluk sağlandığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Isı tekerleği, performans, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD).

Determination of Performance of the Heat Wheel via CFD

ABSTRACT

Heat wheel is a heat exchanger in which the working fluid is air and also it has parallel and counter current flow layout. These type heat exchangers are used for enthalpy recovery and/or air dehumidification processes. By means of numerous micro channels they have, it is enable for heat wheels to transfer the heat so quickly and in a short span of time, which makes them superior. In this thesis, performance of the heat wheel used for enthalpy recovery was numerically determined. Utilizing Computational Fluid Dynamics (CFD) approach, the alteration of the wheel efficiency with time was investigated. With the help of ANSYS Fluent software in which calculations were made, the temperature distributions by location were presented graphically. The obtained results then compared to experimental and theoretical findings and it is seen that they were in good agreement with each other.

Keywords: Heat wheel, performance, computational fluid dynamics (CFD).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Artan enerji ihtiyacına paralel olarak ortaya çıkan enerji ve çevre ile ilgili sorunlar bu alanında çalışma yapan bilim insanlarını yeni arayışlara yönlendirmiş; bunun sonucunda da yeni malzemelerin ve teçhizatların icat edilmesini beraberinde getirmiştir. Son yıllarda yayımlanmış olan bir rapora göre, dünya enerji tüketiminde 2035 yılına kadar % 47 oranında bir artış meydana geleceği öngörülmektedir. Enerji tüketimine ek olarak fosil yakıt kaynaklı karbon emisyonları da 1900'lü yıllardan beri artmaktadır [1]. Bu trendin önümüzdeki yıllarda da devam edeceği bilim insanları tahmin edilmektedir. Günümüzde bu problemlerin bir çözümü olarak yeni teknolojilerin geliştirilmesi kaçınılmaz olmuştur. Bu amaçla özellikle enerji verimliliği konusu daha fazla önem kazanmış, konvansiyonel cihazlar/ekipmanlar yerine enerjii daha verimli kullanan cihazlar geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, özellikle ısı ve nem geri kazanımı başta olmak üzere hava temizleme, gaz ayırma gibi işlemlerde kullanılan ısı tekerleğinin performansı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı kullanılarak belirlenmiştir. Isı tekerleği, paralel ve karşıt akış düzenine sahip bir hava-hava ısı değiştiricisidir. Sahip olduğu mikro kanal geometrisinin bu tip ısı değiştiricilerine yüksek etkileşim alanı sağlaması, bu cihazların daha hızlı ve daha verimli birer ısı değiştirici olmasını sağlamaktadır. Bu ısı değiştiricisini emsallerinden ayıran en önemli fark, kullanımı esnasında birbirine paralel ve zıt yönlü olarak akmakta olan farklı sıcaklıklardaki iki akış hacmi arasında dönme hareketi yapması ve bu sayede ısı transferinin daha hızlı gerçekleşmesini sağlamasıdır. Ayrıca bu cihazların en temel parçası olan dolgu malzemeleri, sahip oldukları gözenekli yapı sayesinde ısı transferinde yüksek verimlilik sağlamakla birlikte kütle transferini de mümkün kılmaktadır. Literatürde ısı tekerleğinin verimliliğini belirlemek amacıyla birçok deneysel ve teorik çalışma mevcuttur. Bu çalışmaların bazıları şöyle özetlenebilir:

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: erdemciftci@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 547-554

Ge ve diğerleri (2007), nem alma işlemleri için kullanılan döner tekerlek tipi bir nem çekme ekipmanının (nem alma tekerleği) ve bulunduğu sistemin performans analizlerinde kullanmak üzere bir matematik model geliştirmişlerdir. Bu amaçla öncelikle nem alma tekerleğinin çalışma prensibi üzerine odaklanmış, baskın olan ısı ve kütle transfer mekanizmaları üzerinden bir matematik model oluşturmuşlardır. Korunum denklemleri, ideal şartlar ve bazı kabuller ışığında farklı sistemler için gaz tarafı direnci (GTD), gaz ve katı tarafı direnci (GKTD) gibi çözüm modelleri elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu modelleri deneysel bir çalışmaya uygulayarak karşılaştırma yapmışlardır. Karşılaştırma sonucunda GTKD modelinin GTD modeline göre daha hassas ancak daha karmaşık yapıda olduğunu göstermişlerdir [2].

Zhang ve diğerleri (2010), eşit sıcaklık şartları altında hidrodinamik olarak tam gelişmiş, ısı olarak gelişmekte olan sinüzoidal oluk biçimli kanallarda ısı geçişini ve basınç düşüşünü incelenmişlerdir. Yüksek hassasiyetli ve kapalı çözüm yönteminin kullanıldığı bir sayısal yöntem ile kütle ve enerji korunum denklemlerinin sonlu farklar metodu ile ayrıştırılmasını detaylı olarak yaptıkları bu çalışmada; Reynolds sayısı, bölgesel ve ortalama Nusselt sayıları gibi boyutsal sayıları hesaplamışlardır. Çalışma sonucunda elde edilen verilerin bal peteği tipi kanallara sahip rejeneratif ısı değiştiricilerinin performans analizlerinde kullanılmasında yararlı olabileceğini belirtmişlerdir [3].

Tu ve diğerleri (2013), ısı geri kazanımı ve nem alma işlemleri için kullanılan rejeneratif tekerlekler için matematiksel model oluşturmuşlar ve kurdukları deney düzeneği ile bu modeli doğrulamışlardır. Substrat (sentezlenen-ayrışan) madde, dönme hızı ve hava karışımının ısı /nem alma tekerleği performansı üzerine etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışma neticesinde yüksek ısı kapasiteye ve düşük ısı iletkenliğe sahip substrat maddelerin ısı geri kazanımı işlemleri için, düşük ısı kapasiteye ve düşük ısı iletkenliğe sahip substrat maddelerin ise nem alma işlemleri için uygun olduklarını bulmuşlardır. Belirli şartlar altında hem nem alma hem de ısı geri kazanım tekerleğinden maksimum verim sağlayacak optimum bir dönme hızının olduğunu göstermişlerdir [4].

Wu ve diğerleri (2005), tekerlek geometrisini oluşturan matrisin ve kullanılan akışkanın ısı performansını belirlemek için daha önceki çalışmalar sonucu elde edilen matematik modelleri kullanarak rejeneratif ısı tekerleğinin modele dayalı ısı analizini yapmışlardır. Benzer çalışmalardan farklı olarak akış yönündeki ısı iletimini de hesaba katıp dönme hızının, ortalama akışkan sıcaklığının ve akış hızının performansına olan etkilerini teorik olarak incelemişlerdir. Çalışma sonucunda ısı tekerleğinin termal analizinde kullanılacak bir model ortaya koymuşlardır [5].

Sphaier ve Worek (2005), ısı ve nem alma tekerleklerinde eksenel difüzyonu incelemek için ısı ve kütle transferinin iki boyutta (eksenel ve radyal yönlerde)

gerçekleştiğini kabul ederek matematiksel bir model oluşturmuşlardır. Elde ettikleri denklemleri sayısal olarak çözmüşler ve bu verilerden Biot sayısı, dönme hızı, gözenekli yapıdaki substrat maddenin en-boy oranı gibi eksenel difüzyonu temsil eden parametrelerin değişimini incelemişlerdir. Ortaya koydukları sonuçların tasarım aşamasındaki bir nem alma tekerleği için işletme şartlarında eksenel difüzyonun oluşup oluşmadığı hakkında bilgi vermesi açısından önemli olduğunu vurgulamışlardır [6].

Nobrega ve Brum, döner tip ısı ve kütle değiştiricileri için basit bir matematiksel model kurmuşlardır. Kurdukları modeli ve $\varepsilon - NTU$ yöntemini kullanarak ısı ve nem alma tekerlerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Atmosferik şartlara bağlı olmakla birlikte ısı tekerleğinin nem alma tekerleğine kıyasla daha verimli olduğunu sonucunu elde etmişlerdir [7].

Niu ve Zhang, katı malzemedeki direncin hem eksenel hem de kalınlık doğrultusunda olduğunu ifade eden iki-boyutlu birleşik ısı ve kütle transferi modelini kullanarak nem alma tekerleğindeki ısı ve kütle transferini simüle etmişlerdir. Sayısal analizlerle gizli ve duyulur ısı geri kazanımı, havanın nemini alma gibi işlemler için optimum dönme hızını belirlemişlerdir. Her iki uygulama için mikro kanallardaki duvar kalınlığının optimum dönme hızına olan etkilerini araştırmışlardır. Duvar kalınlığının artmasıyla optimum dönme hızının azaldığını, nem alma işleminin ısı geri kazanımına oranla duvar kalınlığından daha çok etkilendiğini bulmuşlardır [8].

Ruivo ve diğerleri, atmosferik basıncın nem alma tekerleğindeki ısı ve kütle transfer hızlarına olan etkilerini sayısal olarak araştırmışlardır. Higroskopik malzeme olarak silicagel kullandıkları çalışmalarında proses ve rejenerasyon hava hızlarını sabit almışlardır. Çalışma sonucunda atmosfer basıncının düşmesiyle orantılı olarak ısı ve kütle transfer hızlarında da bir düşüş yaşandığını gözlemlemişlerdir. Bu sonucun özellikle uzun olmayan mikro kanallarda ve hava debisinin çok düşük olduğu durumlarda daha belirgin olduğunu belirtmişlerdir [9].

Zhang ve diğerleri, bal peteği tipi adsorban yataklarda (nem alma tekerleği) farklı dolgu malzemesi kullanımının nem alma verimine olan etkisini karşılaştırmışlardır. Bu amaçla, yaygın olarak kullanılan 10 adet dolgu malzemesi seçmişler ve her bir malzeme için proses havası sıcaklığı, rejenerasyon havası sıcaklığı ve nem miktarının, sistemin performans parametreleri olan COP, SDP ve ε_d üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Seçilen bu malzemeler içerisinden aynı çalışma şartları altında ve düşük rejenerasyon havası sıcaklıklarında silicagel 3A ve silicagel RD'nin en iyi sonuçları verdiğini gözlemlemişlerdir [10].

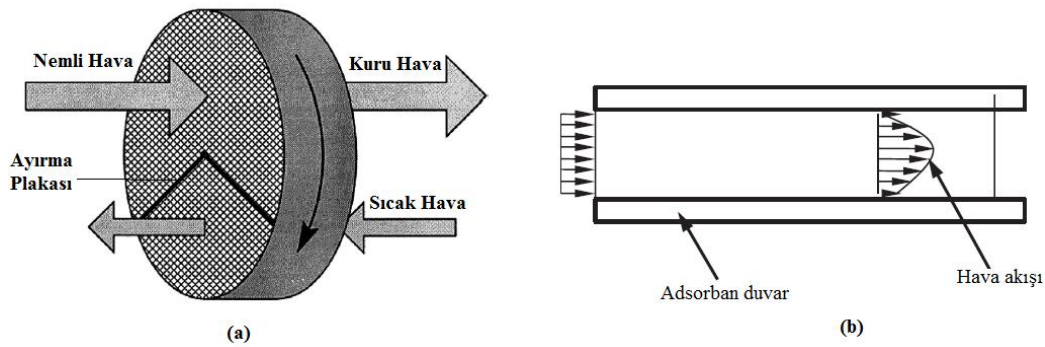
Zhang ve Niu, ısı ve nem alma tekerleklerinin çalışma şartlarının farklı olması nedeniyle her iki ekipmanın ısı ve kütle transferi karakteristiklerini incelemiş ve birbirleriyle kıyaslamışlardır. Çalışmalarında dolgu malzemesindeki ısı iletimini, hem eksenel hem de

kalınlık yönündeki yüzey ve gaz difüzyonunu hesaba katan çift yönlü difüzyon içeren iki-boyutlu zamana bağlı ısı ve kütle transferi modelini kullanmışlardır. Her bir durum için tekerleklerin dönme hızının, NTU değerinin ve ısı/kütle transfer alanının performans etkilerini araştırmışlardır. Isı geri kazanımı ve nem alma proseslerini psikometrik diyagram üzerinde göstererek bu iki uygulamanın farklı ısı ve kütle transfer mekanizmalarına sahip olduklarını belirtmişlerdir [11].

Literatürdeki bu çalışmalar incelendiğinde; ısı tekerleği performansının teorik olarak belirlenmiş olduğu hesaplamalarda bazı kabuller yapılarak çözüm elde edilebildiği anlaşılmaktadır. Bunun yanı sıra, dönme sayısının performans üzerine olan etkisinin sayısal olarak incelendiği çalışma sayısının da çok az olduğu görülmektedir. Yukarıda bahsedilen eksiklikleri gidermek amacıyla yapılan bu çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği sayısal analiz yöntemi ile dönme sayısının ısı tekerleği performans parametreleri üzerine olan etkileri, zamana bağlı çalışma şartları altında araştırılmıştır. Deneysel bir çalışmada kullanılan başlangıç sınır şartları ile sayısal çözümün sınır şartları oluşturulmuş, elde edilen veriler deneysel ve teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

2. ISI TEKERLEĞİ (HEAT WHEEL)

Isı tekerleği, havanın iş akışkanı olarak kullanıldığı, zıt yönlü ve paralel akım düzenine sahip bir ısı ve kütle değiştiricisidir (Şekil 1). Bu ısı ve kütle değiştiricileri; adsorban (yüzeyinde tutma özelliği olan, yüzeyinde tutan) yatak tipi ısı ve kütle değiştiricilerinin sürekli rejimde çalışmasına ihtiyaç duyulmasına istinaden ortaya çıkmıştır. Bu tip ısı ve kütle değiştiricilerine rejeneratif (kendini yenileyen) ısı ve kütle değiştiricileri de denilmektedir [12].



Şekil 1. Isı tekerleğinin genel bir görünümü (a) ve kanallardaki akış profili (b) (A general view of heat wheel (a) and velocity profile in channels) [1]

Rejeneratif ısı değiştiricilerinde diğer eşanjörlerde de olduğu gibi ısı transferi dolaylı olarak gerçekleşir. Sıcak akışkan tarafından (genellikle hava) bir ortamda (adsorban malzeme yüzeyinde) tutulan ısı daha sonra

soğuk akışkana verilerek ısı transferi sağlanmış olur. Her cihaz gibi bu cihazlarında hem üstünlükleri hem de kısıtlamaları vardır. Rejeneratif ısı değiştiricilerinin sahip olduğu üstünlükler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Kompakt ısı değiştiricileri sınıflandırması yapmak üzere belirlenmiş olan yüzey alanı yoğunluğunun¹ (kompaktlık- β) çok büyük değerlere çıkabilmesi (Rejeneratif ısı değiştiricileri için bu değer 1600-16000 m^2/m^3 arasında değişmektedir.) [12],
- ✓ İlk yatırım masrafının az olması,
- ✓ Sistemin kendi kendini temizleme özelliğinin bulunması,
- ✓ Yüksek etkenliğe ve buna karşın küçük basınç düşümüne (ΔP) sahip olması,

Bunların yanı sıra şu özellikler ise rejeneratif ısı değiştiricilerinin kullanımlarını kısıtlamaktadır:

- ✓ İş akışkanı olarak sadece gaz akışkanların kullanılabilmesi,
- ✓ Sıcak ve soğuk akışkanlar arasında her zaman bir miktar kaçak olması (Bu durum özellikle akışkanların karışmasının istenmediği durumlarda büyük bir engeldir),
- ✓ İş akışkanlarının birbirine etki ediyor olması,

3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS)

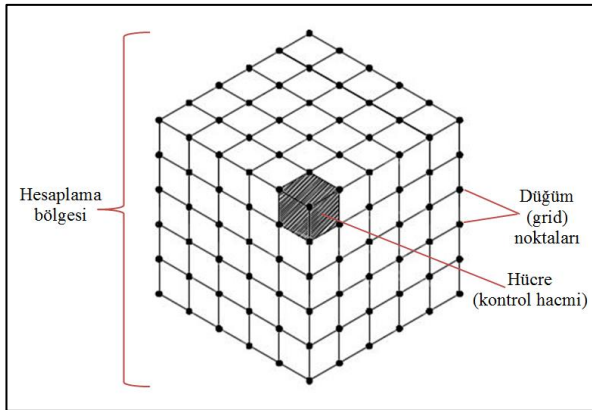
Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (bundan sonra HAD olarak taksir edilecek); akış, ısı ve kütle transferi problemlerinin sayısal olarak çözümlendiği bir analiz yöntemidir. Akışkanın hareketini tanımlayan diferansiyel denklemlerin çözümlendiği bu yöntem, özellikle deneysel çalışmalarla elde edilemeyen kayma gerilme, hız, basınç ve sıcaklık dağılımları, akışa ait akım çizgileri gibi akış alanı hakkındaki ayrıntıları elde etmek için

kullanılmaktadır. Ayrıca, HAD analizleri sonucu elde edilen verilerin benzer deneysel ve teorik çalışmalarla karşılaştırılması ve doğrulanması bir sonraki süreçte

¹ Isı geçiş yüzey alanının (m^2) ısı değiştirici hacmine (m^3) oranı, yüzey alanı yoğunluğu ya da kompaktlık (β) olarak adlandırılır.

gerekli deney sayısını düşürerek tasarım sürecinin kısalmasına da katkıda bulunurlar [13].

HAD analizlerinde, problemin temel denklemleri ile sınır şartlarının akış alanı içerisinde sonlu sayıda nokta için diferansiyel formdan cebirsel forma dönüştürüldüğü ifade edilmiştir. Bir hesaplama bölgesi seçilerek yukarıda bahsedilen bu çözüm noktalarını içeren akış alanının oluşturulması HAD analizlerinde ağ (örgü) yapısı oluşturma (meshing) olarak ifade edilmektedir. Ağ yapısı içerisindeki her bir sonlu noktaya ise düğüm noktası, grid noktası ya da çözüm noktası denilmektedir (Şekil 2). Oluşturulan ağ yapısının çok sayıda küçük elemanlara dönüştürülmesiyle hücre adı verilen birimler oluşturulur. Bu birimler 2-boyutlu analizlerde alanlar, 3-boyutlu analizlerde ise hacimlerdir [13].



Şekil 2. 3-boyutlu bir ağ yapısındaki elemanlar (The elements in a 3-D meshing)

HAD analizlerinden elde edilen sonuçların niteliği, büyük ölçüde oluşturulan ağ yapısının kalitesine bağlıdır. Ticari HAD yazılımlarında oluşturulan ağ yapısının kalitesini gösteren bazı parametreler vardır. Bu parametreler; çarpıklık oranı, diklik kalitesi ve eleman kalitesidir. Bu çalışmada oluşturulan ağ yapısının kalitesi Çizelge 1’de verilmiştir.

Çizelge 1. Ağ yapısının kalitesini gösteren parametreler ve değerleri (The mesh metrics and their values)

Parametre	En küçük değer	En büyük değer	Ortalama
Çarpıklık oranı (-)	1,3057	0,9388	0,2317
Diklik kalitesi (-)	0,1107	1	0,9172
Eleman kalitesi (-)	0,1020	0,9989	0,8213

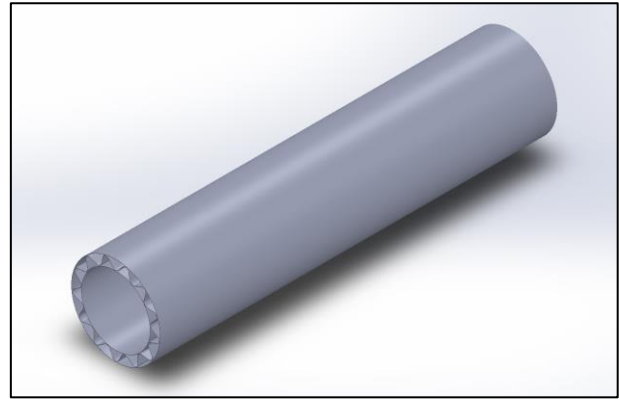
4. YÖNTEM (METHOD)

4.1. HAD Modelinin Oluşturulması (Constitution of CFD Model)

Bilgisayar yardımıyla sayısal analizi gerçekleştirilecek olan bir problemin analizine geçmeden önce yapılması gereken ilk işlem problemin geometrisini tam anlamıyla yansıtan bir modelinin oluşturulmasıdır. HAD analizi yapılacak olan ısı tekerleğinin modeli bir CAD programı vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Modele ait bir görüntü Şekil 4’de verilmiştir.

Şekil 3’de görüldüğü gibi, ısı tekerleğini oluşturan her bir kanal çok küçük bir hacme sahiptir. Isı transferinin büyük ölçüde etkin ve hızlı gerçekleşmesini sağlayan bu geometrik yapının ticari bir HAD yazılımıyla analizi için çok güçlü bilgisayarlar gereklidir. Çünkü model üzerinde oluşturulacak olan ağ yapısı fazla sayıda (birkaç milyon üzerinde) düğüm noktası ve hücre içerecektir ki bu da analizlerin çok uzun (bazen haftalarca) sürmesine neden olacaktır. Bu sebeple çoğu HAD analizinde modelin tamamı için geçerli tüm fiziksel şartları yerine getiren daha basit bir model oluşturulup analiz işlemlerine geçilmektedir. Bu yaklaşım özellikle simetrik geometriye sahip problemlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

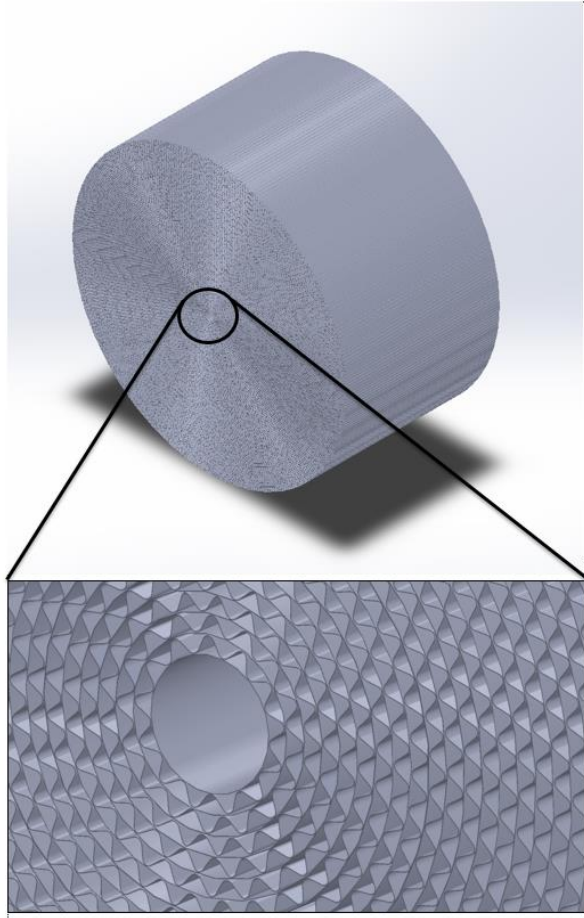
Yapılan çalışmada literatürdeki çalışmalardan farklı olarak tek bir kanal yerine kanal halkası (Şekil 3) olarak ifade edilen 3-boyutlu akışkan bölgesinde analizler yapılmıştır. Kanal halkası, ısı tekerleği üzerindeki bir daire halkasını oluşturan kanalların meydana getirdiği geometri olarak tanımlanabilir. Bu geometri, gerçek geometriyi tüm özellikleriyle yansıtan basitleştirilmiş modeldir. Gerçek ve basitleştirilmiş modelin geometrik özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir.



Şekil 3. Analizi yapılan basitleştirilmiş modele (kanal halkası) ait bir görünüm (A general view of analyzed channel circle)

Çizelge 2. Gerçek ve basitleştirilmiş modelin geometrik özellikleri (The geometric properties of real and simplified model)

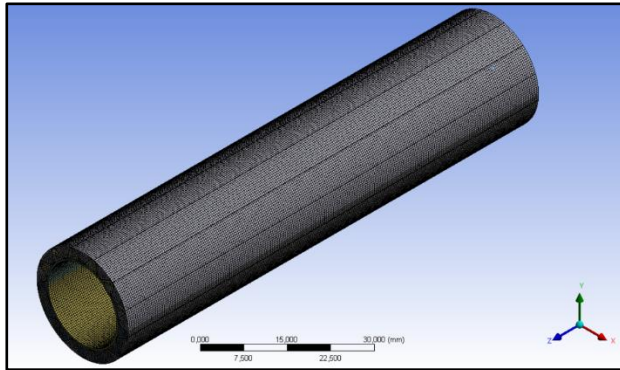
Özellik / Model Tipi	Gerçek model	Basitleştirilmiş model
Tekerlek çapı (mm)	300	17 / 22 (iç/dış)
Kanal geometrisi	Sinüzoidal	Sinüzoidal
Kanal genişliği (mm)	2,5	2,5
Kanal malzemesi kalınlığı (mm)	0,12	0,12
Cidar kalınlığı (mm)	1,9	1,9
Kanal uzunluğu (mm)	100	100



Şekil 4. Isı tekerleğini oluşturan mikro kanallar ve bu kanalların yakından görünümü (The micro channels geometry consisted of heat wheel and zoomed view of them)

4.2. Ağ Yapısının Oluşturulması (Meshing)

Isı tekerleğinin sahip olduğu silindirik şekilden dolayı süpürme (sweep) yöntemi ile dörtgen şeklindeki hücrelerden oluşan bir ağ yapısı oluşturulmuştur. Sadece en-kesiti geometri boyunca değişmeyen modellere uygulanabilen bu yöntemde, sabit kesit alanında oluşturulan ağ yapısı tüm geometri boyunca bir uçtan diğer uca devam ettirilerek ağ yapısı oluşturulur. Şekil 5’de ağ yapısına ait bir görünüm verilmiştir.



Şekil 5. Basitleştirilmiş model üzerinde oluşturulan ağ yapısı (Created mesh at simplified model)

Oluşturulan ağ yapısı 551447 adet düğüm noktasından ve 386500 adet elemandan oluşmaktadır. Model eğrisel yapıda unsurlar içerdiğinden, eleman şekil ve boyutlarını bu unsurlara göre ayarlayan Curvature size function seçeneği aktif edilmiştir.

4.3. Sayısal Analiz İşlemleri (Numerical Analysis Processes)

HAD analizlerinde, ağ yapısının oluşturulması ve kalitesinin irdelenmesinin ardından uygun bir ağ yapısına karar verildikten sonra sayısal analize geçilmektedir. Sayısal analiz işlemleri Ansys programının Fluent modülünde gerçekleştirilmiştir. Bu modülde yapılan işlemler şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ İlk olarak Check Mesh (Ağ yapısını kontrol et) seçeneği ile oluşturulan ağ yapısının genel kontrolleri sağlanmıştır. Ağ yapısı oluşturma işlemi neticesinde hacim elemanlarının negatif değerde bir hacme sahip olmaması gerektiğine dikkat edilmelidir. Oluşturulan ağ yapısında böyle bir durumla karşılaşılmasıdır.
- ✓ Kontrol işlemi tamamlandıktan sonra çözücü ayarları yapılmıştır. Basınç tabanlı, zamana bağlı çözücü ve de doğal taşınımın da etkisini görmek amacıyla Gravity (yerçekimi, y ekseninde $-9,81 \text{ m/s}^2$) etkin hale getirilmiştir.
- ✓ Isı transferini de hesaplamak için enerji denkleminin çözdürülmesini sağlayan Energy (enerji) seçeneği on (açık) olarak ayarlanmıştır.
- ✓ Materials (malzemeler) sekmesinden ısı tekerleği malzemesini oluşturan silicagelin termofiziksel özellikleri girilmiştir (Çizelge 4.3).
- ✓ Cell Zone Conditions (Hacim bölgeleri için sınır şartları) sekmesinden ısı tekerleğinin dönme devir sayısı (10 d/d) girilmiştir.
- ✓ Boundary Conditions (Sınır şartları) menüsünden akışkan bölgelerinin sahip olduğu sınır şartları girilmiştir. Bu sınır şartları soğuk ve sıcak hava akımları için sırasıyla 297,15 K sıcaklık, 3,8 m/s akışkan (hava) hızı ile 308,15 K sıcaklık, 3,8 m/s akışkan (hava) hızıdır. Yapılan sayısal çalışma sonuçlarını benzer çalışma sonuçlarıyla kıyaslama açısından bu sınır şartları seçilmiştir [1]. Akışkan hızları süreklilik denkleminde faydalanılarak hesaplanmıştır.
- ✓ Isı tekerleğinin çalışma esnasındaki dönme hareketini simüle etmek için, dönecek olan hacim ve bu hacim ile ortak bir ara yüzeye sahip başka bir sabit hacim arasında Mesh Interface (ağ yapıları arasında ara yüz tanımlama) işlemi yapılmıştır. Bu işlem sayesinde ısı tekerleğinin girilen dönme devir sayısına bağlı olarak açısal dönme hareketi yapması sağlanmıştır. Fluent modülündeki bu işleme Sliding Mesh Method-SMM- (kayan ağ metodu) denilmektedir³.
- ✓ Solution Methods (Çözüm yöntemleri) menüsünden Coupled (Birleşmiş, Bağlaışık) düzeninde; Basınç için PRESTO!, enerji ve

momentum denklemlerinin çözümü için ise Second Order Upwind (İkinci derece Upwind) Metotları seçilmiştir. Zamana bağlı formülasyon için ise Second Order Implicit (İkinci Dereceden Kapalı) metot kullanılmıştır³.

- ✓ Solution Controls (Çözüm kontrolleri) sekmesinde Flow Courant Number (Akış Courant sayısı) 1 olarak ayarlanmıştır.

5. BULGULAR (FINDINGS)

Isı tekerleğinin dakikada 10 devir döndürülmesi ile oluşan sıcaklık dağılımlarını ve ısı transferini incelemek için yapılan sayısal çözümleme sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 6'da verilmiştir. Sonuçların daha detaylı incelenebilmesi için 100 mm uzunluğa sahip ısı tekerleği üzerinde 20 mm aralıklarla 6 bölgede sonuçlar incelenmiştir ($z=0 - 0.1$ m).

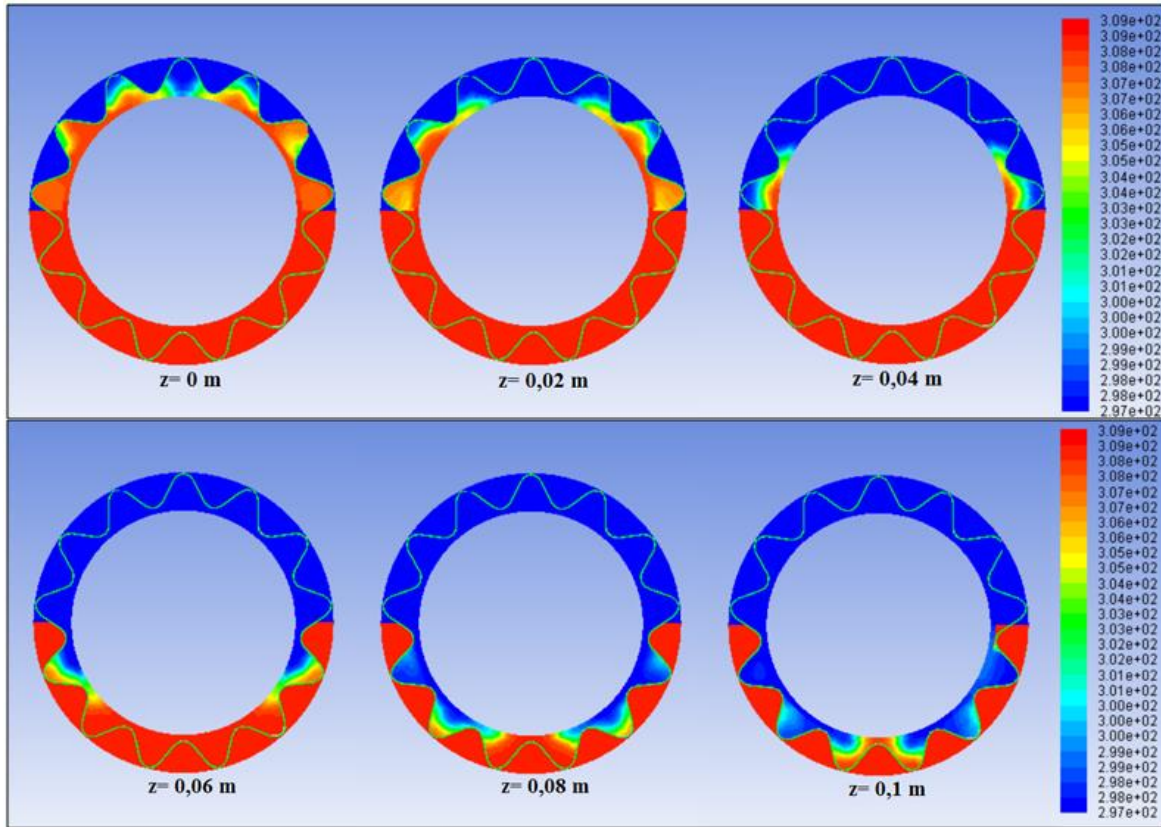
olduğunu belirtmiştir [1]. Zhang tarafından yapılan bu çalışma, aynı sınır şartları kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçlarının değerlendirilmesinde referans olarak kullanılmıştır.

Isı değiştiricilerinin etkenliği "Eş.1" de verilen bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (1)$$

Bu bağıntıda (Q) bir ısı değiştiricisinde gerçekleşen ısı transferini, (Q_{max}) ise aynı şartlar altında bu ısı değiştiricisinde gerçekleşebilecek maksimum ısı transferidir. "Eş. 1" den yararlanarak 10 d/d dönme hızında ısı tekerleğinin etkenliği

$$\varepsilon_{10\ d/d} = \frac{Q_{gercek}}{Q_{max}} = \frac{8,5415 \cdot (303,9 - 297,15)}{8,5415 \cdot (308,15 - 297,15)} = 0,6107 \quad (2)$$



Şekil 6. $n=10$ d/d dönme sayısında elde edilen ölçüm noktalarındaki sıcaklık dağılımları (The temperature distribution on the measurement points for $n=10$ rpm rotational speed)

Analiz sonuçlarında akışkanlar arasında gerçekleşen ısı transferi sonucu soğuk ve sıcak akışkanların ortalama çıkış sıcaklıkları sırasıyla 301,4 K ve 303,9 K bulunmuştur.

Zhang (2014), dakikada 0 ile 50 devir aralığında değişen dönme hızlarında ısı tekerleği performansını incelemiştir. Tek bir kanal kullanarak yaptığı sayısal ve hazırladığı düzenek ile yaptığı deneysel çalışma sonucunda, ısı tekerleğinin 10 d/d ile dönmesi halinde etkenliğinin maksimum değere ulaştığını ve bu devirdeki dönme hızının ısı geri kazanımı için optimum değer

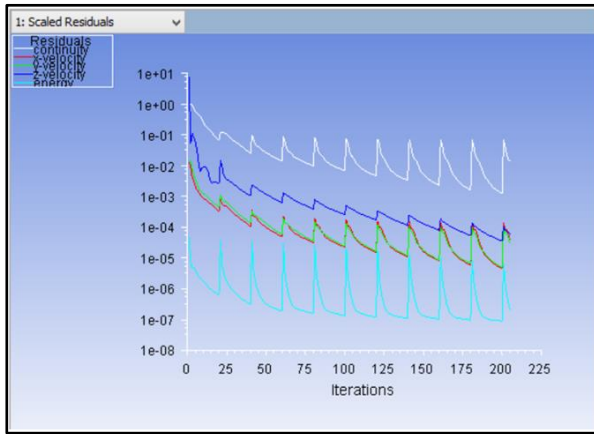
Bu denklemde 8,5415 olarak verilen değer ısı kapasite debisi (C) olarak tanımlanmaktadır. Isıl kapasite debisi "Eş. 3"de verilen denklemde hesaplanmıştır.

$$C = \dot{m}c_p = 0,0085 \cdot 1005 = 8,5415\ W/K \quad (3)$$

"Eş. 2"de görüldüğü gibi 10 d/d dönme hızında ısı tekerleğinin etkenliği 0,6107 olmaktadır. Yapılan sayısal analiz sonucuna göre, ısı geri kazanım oranının % 61,1 olduğu söylenebilir.

HAD yaklaşımı kullanılarak yapılan sayısal analizlerde, korunum denklemlerindeki terimlerin denklemin tek bir

tarafında toplanamaması sonucu, çözüm bölgesindeki her bir hücre için artık (residual) olarak tanımlanan veriler oluşur. HAD analizlerinde bu verilerin toplamı hiçbir zaman sıfır olmasa da, toplamın sıfıra yakınlığı kullanılarak yapılan çözümün tam çözümden ne kadar saptığı hakkında fikir yürütülebilir. Bu işlem HAD analizlerinde yakınsama olarak tanımlanmaktadır. Yapılan bir HAD çözümlemesinde önceden belirtilen bir kriter gereği çözümün başlatılması ve bu değere yakınsaması gözlemlenir. Çok küçük değerdeki bir yakınsama kriteri için bu işlem ne kadar az iterasyonda gerçekleşirse; problemin tanımlanması, sınır şartlarının oluşturulması ve elde edilen çözüm sonuçlarının doğruluğu o oranda hassas olmaktadır. Bu çalışmada ısı tekerleğinin analizleri için yakınsama kriteri 10^{-6} olarak ayarlanmıştır. Bu kriterde ortalama olarak 240 iterasyonda çözümlerin yakınsadığı gözlemlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 7. 10 d/d dönme hızı için yakınsama grafiği (The convergence view for 10 rpm)

Ağ yapısından bağımsızlık, oluşturulan ağ yapısındaki hücrelerin sayısında, boyutunda veya geometrisinde bazı değişiklikler yapılmasına karşın elde edilen sonuçların kabul edilebilir hata oranları içerisinde olmasıdır. Bu çalışma için ağdan bağımsızlık işlemi, 3 farklı miktarda eleman sayısı oluşturularak yapılan analiz sonuçları ile gösterilmiştir. 10 d/d dönme hızında yapılan analizler sonucunda elde edilen soğuk akışkanın çıkış sıcaklıkları karşılaştırılarak sonuçların ağdan bağımsız olduğu tespit edilmiştir. Her bir eleman sayısında oluşturulan ağ ile ilgili kalite parametrelerinin ortalama değerleri ve soğuk akışkanın çıkış sıcaklıklarındaki değişimler Çizelge 3'de verilmiştir.

Çizelge 3'de görüleceği gibi farklı ağ yapılarında sayısal analizler gerçekleştirilmesine karşın soğuk akışkanın çıkış sıcaklığında çok küçük değişimler olmuştur (Hata payı % 0,2 civarındadır). Ağ yapılarının kaliteleri incelendiğinde, artan eleman sayısına paralel olarak ağ kalitesinin iyileştiği görülmektedir. Ancak yüksek eleman sayılarında çalışmak için çok güçlü bilgisayarlar gereklidir. Bu nedenle hem eleman sayısı hem de kalite parametreleri açısından en uygun olan II numaralı ağ yapısı tipi ile sayısal analizler gerçekleştirilmiştir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS & DISCUSSION)

İş akışkanı olarak farklı sıcaklıklara sahip iki gaz akışkanın (genellikle hava) kullanıldığı döner dolgu maddeli, paralel ve karşıt akışlı rejeneratif ısı değiştirici (ısı tekerleği) performansının hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile belirlendiği bu tez çalışmasında; sinüzoidal kanal geometrisine sahip, iş akışkanı hava olan ve adsorban malzeme olarak silicagel'in kullanıldığı bir ısı tekerleği modeli oluşturulmuştur. Analizi yapılan model 22 mm iç çapa ve 17 mm dış çapa sahiptir. Kullanımı esnasında sabit bir açılma hızla dönme hareketi yapan ve bu sayede sürekli rejimde çalışabilme olanağı sunan bu ısı değiştiricisinin 10 d/d devir sayısında dönmesi durumunda performansındaki değişimler sayısal olarak incelenmiştir. Bu çalışma sonucu elde edilen veriler ve ileride yapılabilecek çalışmalar genel hatlarıyla şu şekilde özetlenebilir:

- ✓ Isı tekerleğinden elde edilecek performansın büyük ölçüde dönme sayısına bağlı olduğu ve bu cihazlardan en iyi verimi alabilmek için bir optimal dönme sayısı olduğu yapılan çalışma ile bir kez daha kanıtlanmıştır. Bu çalışmadaki sınır şartlarında ısı tekerleği için optimum performans 10 d/d dönme hızında elde edilmiştir.
- ✓ 10 d/d dönme hızı için ısı tekerleğinin etkenliği %61,1 olarak hesaplanmıştır.
- ✓ Karmaşık geometriye sahip bir problemin çözümü için sayısal yöntem kullanmanın sağladığı fayda anlaşılmıştır.
- ✓ Bu çalışmada adsorban malzeme olarak silicagel (Type A) kullanılmıştır. İş akışkanlarının giriş hızları eşit kabul edilmiştir. Gelecek çalışmalarda farklı adsorban malzemeler ya da birbirinden farklı iş akışkanı hızları kullanılarak sayısal veya deneysel olarak ısı tekerleği performansı incelenebilir.

Çizelge 3. Oluşturulan ağ yapıları ve soğuk akışkan için elde edilen sıcaklık değerleri (Constituted meshes and obtained temperature values for cold fluid)

Ağ çeşitleri	Ağ Kalitesi Göstergeleri			Ağ özellikleri		Soğuk akışkan çıkış sıcaklığı (K)
	Çarpıklık Oranı	Diklik Kalitesi	Eleman Kalitesi	Eleman sayısı	Düğüm sayısı	
Ağ yapısı-I	0,2112	0,9321	0,8655	854478	1172006	301,75818
Ağ yapısı-II	0,2317	0,9172	0,8213	386500	551447	301,38965
Ağ yapısı-III	0,3240	0,8346	0,7175	144622	216384	301,05698

- ✓ Isı tekerleğinde kullanılan katı malzemenin (adsorban yatak) kimyasal özelliklerinin etkisiyle hızla gerçekleşen ısı transferinde katı malzeme bünyesindeki ısı iletimi çoğu çalışmada ihmal edilmektedir. Katı malzemedeki ısı iletiminin de hesaba katıldığı yeni çalışmalar yapılabilir.
- ✓ Isı tekerleğinin çalışması esnasında oluşan iş akışkanlarının birbirine karışması problemi için malzeme teknolojisindeki gelişmelerden de faydalanarak yeni tür sızdırmazlık elemanları geliştirilebilir.
- ✓ Sadece gaz akışkanların kullanıldığı bu tür ısı değiştiricilerinde sıcak ve/veya soğuk akışkanların türü değiştirilerek ısı performansını iyileştirilmesi sağlanabilir.

SIMGE VE KISALTMALAR (NOMENCLATURE)

c_p	Özgül ısı [$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]
\dot{m}	Kütleli debi [gs^{-1}]
N	Devir sayısı [d/d]
\dot{Q}	Isı transferi [W]
T	Sıcaklık [K]
ΔT	Sıcaklık farkı [K]
ε	Etkenlik (-)
ρ	Yoğunluk [kgm^{-3}]
β	Kompaktlık [$\text{m}^{-2}\text{m}^{-3}$]
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışmanın oluşturulması süresince 2210-C kodlu teşvik bursu ile verdiği destekten dolayı TÜBİTAK'a (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Zhang, L., "Conjugate Heat and Mass Transfer in Heat Mass Exchanger Ducts (First Edition)", USA: Elsevier Inc., 1-92, (2014).
2. Ge, T. S., Li, Y., Wang, R. Z. And Dai Y. J., "A review of the mathematical models for predicting rotary desiccant wheels", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12: 1485-1528, (2008).
3. Zhang, L. Z. and Niu, J. L., "A numerical study of laminar forced convection in sinusoidal ducts with arc lower boundaries under uniform wall temperature", *Numerical Heat Transfer: Part A: An International Journal of Computation and Methodology*, 40: 55-72, (2010).
4. Tu, R., Liu, X. H. and Jiang, Y., "Performance comparison between enthalpy recovery wheels and dehumidification wheels". *International Journal of Refrigeration*, 36: 2308-2322, (2013).
5. Wu, Z., Melnik, R. V. N. and Borup, F., "Model-based analysis and simulation of regenerative heat Wheel", *Energy and Buildings*, 38: 502-514, (2006).
6. Sphaier, L. A. and Worek, W. M. "The effect of axial diffusion in desiccant and enthalpy wheels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49: 1412-1419, (2006).
7. Nobrega, C. E. L. and Brum, N. C. L. "Modeling and simulation of heat and enthalpy recovery wheels", *Energy*, 34: 2063-2068, (2009).
8. Niu, J. L. and Zhang, L. Z. "Effects of wall thickness on the heat and moisture transfers in desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(2): 255-268, (2002).
9. Ruivo, C. R., Costa, J. J. and Figueiredo, A. R. "Numerical study of the influence of the atmospheric pressure on the heat and mass transfer rates of desiccant wheels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 54: 1331-1339, (2011).
10. Zhang, L. Z., Fu, H. X., Yang, Q. R. and Xu, J. C. "Performance comparisons of honeycomb-type adsorbent beds (wheels) for air dehumidification with various desiccant wall materials", *Energy*, 65: 430-440, (2013).
11. Zhang, L. Z. And Niu, J. L. "Performance comparisons of desiccant wheels for air dehumidification and enthalpy recovery", *Applied Thermal Engineering*, 22: 1347, 1367, (2002).
12. Genceli, O. F., "Isı Değiştiricileri (Birinci Baskı)", Birsen Yayınevi, İstanbul, 12- 61, (2010).
13. Çengel, Y. A., Cimbala, J. M. "Akışkanlar mekaniği temelleri ve uygulamaları (çev. T. Engin, H. R. Öz, H. Küçük ve Ş. Çeşmeci). İzmir: Güven Bilimsel Yayınevi, İzmir, 818-830, (2010).

On the electroosmotic and MHD Jeffery–Hamel flow of Nano fluid influenced by wall slip conditions

Jacob Nagler

Jacob Nagler Graduated Bsc. (2011) and M.E. (2013) at the Technion, Faculty of Aerospace Engineering.

Affiliation: IAF & NIRC, Haifa, 34345, Israel.

(Received : 10.03.2016 ; Accepted : 05.04.2016)

ABSTRACT

Combined MHD and electroosmotic Jeffery–Hamel flow of Nano fluid type inside a wedge (inclined walls) with non-linear viscosity and wall friction are investigated analytically. As a result of similarity relations, one nonlinear ordinary differential equation is obtained and solved analytically with the appropriate assumptions ($f^2 \square f, 0 < \theta \leq 20^\circ$). Moreover, excellent agreement was found between the obtained analytic solution and suggested simple parabolic approximation. Although it was found that in case where more effects are gradually being considered, a slight difference is emerged, but the most dramatic change between solutions occurs when solid to fluid ratio gets significant value. In addition, suitable match in the quantitatively and qualitatively aspects was found between literature results and obtained solution. In addition, analytical solution parametric investigation was performed for specific parameters choice. It was found that the normalized velocity was found to decrease gradually with the tangential direction progress and/or with friction coefficient increase. However, the normalized velocity profile gets higher values as long as the solid to fluid ratio increases. Additionally, Reynolds, Hartmann and solid volume fraction coefficient increase (separately or all together) have raised the normalized velocity function values. Finally, unprevail distinguished cases were introduced to understand flow complexity. It was found that the electrical field magnitude effect is significantly, especially for small friction coefficient values and for high wedge semi angle. Also, the combination between small friction coefficient values including small parameter flow values (Re and Ha numbers) and high electrically field may lead to un-optimized course of normalized velocity profile. The last case that was examined is concerned with friction coefficient variation effect on the normalized velocity profile for different values of wedge semi angle with high electric field for specific parameters choice. It was found that increasing friction coefficient leads to normalized velocity profile consolidation.

Keywords MHD; electroosmosis; Jeffery–Hamel flow; Nano fluid; slip conditions; friction; nonlinear ordinary differential equations; analytical solution; approximate solutions.

1 INTRODUCTION

Nano fluid mechanics interactions between various fluids type and different surfaces of various geometries have been investigated particularly during the last two decades. General theories on electro kinetic flows are being examined for more than six decades. For instance, in 1965 Rice and Whitehead [1] have presented their study on electro-kinetic flow in a narrow cylindrical capillary regarding the influence of the cylindrical capillary radius on electro-kinetic flow (Debye layer, interface potential). Moreover, nine years later, Sorensen and Koefoed [2] have introduced their study on electrokinetic effects in charged capillary tubes. They determined electrokinetic coefficients in a narrow tube filled with electrolyte solution and with a surface charge. Their model is suitable for stationary, laminar flow of Newtonian fluids under the validity of the linearized Poisson-Boltzmann equation. Their model solution is being coincided with Helmholtz solution in the limit region of the pores which are reported to be large enough compared with the Debye-Huckel length. One year later, Levine *et al.* [3] have published their study on electrokinetic flow in a narrow parallel-plate channel. Their flow model is composed of two charged

walls of non-conducting, infinite parallel plates while the electrolyte has finite size. About three decades later in 2004, new phenomenon of ion enrichment/depletion connected to nano-channel structures has been discovered by Pu *et al.* [4]. They have found that after applying the voltage over the channel, ions are enriched quickly at the one end of the channel while depleted at the other end. Moreover, according their study, a direct link between enrichment/depletion and the extent of double-layer overlap does exist. Over the latter year, Plecis *et al.* [5] have proved the crucial influent of the electrostatic forces in nanofluidics by comparison between their analytical model and experiments. Strengthening the latter argument, analytical model of electrical double layer extension inside nano-channel with charged surfaces has been performed while resulting with the electrostatic exclusion of co-ions and enrichment in counterions, which affects the perm-selectivity of such structures. The authors [5] have demonstrated this phenomenon together with quantitative measurements of the ionic permeability change of Pyrex nano-slit at low ionic strength. They also state that the chemical examination of the Pyrex-water interface can be performed in less complex systems than the nano-slit. In addition, it was found that slit height parameter has an impact on the enrichment for small height values (thin channel) such as the channel should enable to reach higher perm-selectivity

*Corresponding Author

e-mail: syanki@tx.technion.ac.il

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 555-568

for moderate ionic strength. Moreover, their model based on Poisson-Boltzmann equations can be applied in many aspects of biotechnological engineering and industry. It should be noted that according to their study, the diffusive transport of charged species is valid whereas the concentration is low enough compared to the bulk concentration. Two years later, Byun *et al.* [6] have published their study on electroosmosis based nanopipettor development. Their first version of their EO-driven nanopipettor pipe consists of a microfabricated EO pump, a polyacrylamide grounding interface and a nL-pL pipet-tip. According to the study [6], good linear relationships between pipetted/dispensed volume and pipetting/dispensing time including the volume and the voltage applied to the pipettor have been obtained. However, the volume range that was applied in their study is from about 100 pL to about 300 nL, while it can be extended considerably. More details about volume range, pipetting time and channel depth can be found in their study. One year later, new theory of thermodynamic efficiency optimization of an electroosmotic (EO) pump with a large surface area while being highly charged with nanoporous silica disk substrate was presented by Berrouche *et al.* [7]. The researchers have found that the optimum thermodynamic efficiency depends on the following parameters: temperature, silica zeta potential, viscosity, permittivity, ion valency, tortuosity of the nanoporous silica and mostly on the effective normalized pore radius of the substrate. Moreover, they found that by using de-ionized water as the pumping liquid, the optimized EO pump generates the maximum flow rate for specific pressure and under applied given voltage. During the same year, Chen *et al.* [8] have published their essay on new development of electroosmotic pump using nanosilica particles having an average size of 20-30 nm with packed capillary of a 5 cm x 530 μm . Another study from the same year was presented by Chen *et al.* [9]. Their study deals with electroosmotic pumping flow with high flow rate at low applied voltage using relatively thin alumina nano-porous membrane and uniform electric field caused by a contact of perpendicular platinum mesh electrode with the nano-channel inlet. They discovered that the flow rate values are usually high for low electrolyte (KCl) concentrations. In addition, flow rate drop occurs when concentration surpasses certain value. The latter study that was also published in the same year and provided by Seiler and Kirby [10] examines the computational modeling challenges of two dimensional fluid flow phenomenon governed by A/C electroosmosis in the micro and nano scales using COMSOL simulation program compared to numerical/analytical results. Initially, harmonic response of the ion flux with respect to the driving potential has been established and afterwards the Navier-Stokes application model was added. The model was solved and the A/C electroosmosis fluid flow was observed. Two years later, Ai *et al.* [11] have presented their study on the

effects of electroosmotic flow on ionic current rectification in conical nanopores based on Nernst-Planck equations (ionic concentrations), the Poisson equation (electric potential) and Navier-Stokes equations (flow field). They informed that the preferential current direction of a negatively charged nanopore is toward the base (tip) under a relatively high ratio of the tip radius size to the Debye length while direction also changes with the charge polarity of the nanopore. In the same year, Piruska *et al.* [12] have published comprehensive review of Nanofluidics in chemical analysis. They emphasized the difference between nanofluidics and microfluidics systems including thoroughly discussion on chemical applications on various nano systems. Two years later, Aparajita and Satapathy [13] have presented a study on thermal transport analysis of combined electroosmotic and pressure-driven flow of power-law (shear-thinning and shear-thickening) nanofluids through a microchannel. They investigated the effect of different flow and electrolytic parameters on the thermal behavior of the flow under constant wall heat flux condition while taking into account the effects of viscous dissipation and Joule heating. Three nanofluidic parameters that have been taken into consideration are the viscosity, electrical permittivity and electrical resistivity. These parameters have been introduced as ratios with reference to the corresponding properties of a conventional fluid. On the one hand, they found that Nusselt number decreases with decreasing viscosity ratio and/or increasing permittivity ratio. On the other hand, Nusselt number increases with increasing resistivity ratio. Other distinguished studies from the same year of 2012 would be elaborated. The first study was presented by Avsec [14]. He has developed analytic model of nano-fluid motion including elektro-kinetic and electromagnetic forces together with heat transfer effects inside rectangular and circular micro-channels subjected to wall slip conditions. He has found that volume fraction of nano-particles has great influence on the velocity and also on the temperature distribution in the micro-channels. Second study was presented by Imani *et al.* [15] about Jeffery-hamel flow inside divergent channel and nano particles with high magnetic field using reconstruction of variational iteration method (RVIM) for solution. The latter study was performed by Kurtoğlu *et al.* [16]. Their study discusses the magnetic nano-particle suspensions and applications. The authors [16] claim that microscale technology permits the use of micropump while magnetically actuated ferro-fluids could have the potential to be used as an alternative micro pumping system. Last study that will be brought here and was published during 2012 is dealt with laminar, free convection boundary layer flow over a permeable isothermal truncated cone in the presence of a transverse magnetic field effect. A solution with suitable non-similarity analysis has been done by Ahmed and Mahdy [17] for the obtained one non-linear equation. The researchers have used different water

species based on nano-fluids while solving the problem by using fourth order Runge-Kutta with shooting technique (Ag-nanoparticles give a higher rate of heat transfer while TiO₂ nanoparticles yield with the lowest value). Excellent agreement was found between vertical plate problem solutions and their study. Moreover, they found that solid volume fraction increase leads to the increase of the heat transfer rate whereas the skin friction decreases. Additionally, the model of spherical nano-particles was found to be most beneficial in the context of heat transfer rate. Finally, magnetic field parameter increase results with decreasing of both of the velocity and local skin friction coefficient and in increase of the fluid temperature as well as the rate of heat transfer. One year later, similar study as Imani *et al.* [15] was published by Khidir [18]. A new modification of the standard homotopy perturbation method (HPM) including the Chebyshev pseudo spectral methods for solving nonlinear boundary value problems of Jeffery-Hamel flow with the magnetic field and nanoparticle effects is presented in his study [18]. He has shown good agreement between the suggested solution and other numerical solutions. Moreover, he proved that his solution method (SHPM) is more efficient and converges faster than the standard homotopy perturbation method. During his study, he found that increase of volume fraction causes an increase in the fluid velocity profile of diverging channels while the velocity decreases for the converging channels case. Moreover, he also found that the fluid velocity increases with increasing Hartman numbers for both diverging and converging channels cases. During 2013, numbers of distinguished studies of nano applications were emerged. For instance, Sadoughi *et al.* [19] have developed analytical method using reconstruction of variational iteration method (RVIM) based on Pade' approximation and Keller's box method in order to solve the non-linear two-dimensional forced convection boundary layer magneto hydro-dynamic (MHD) incompressible flow of AL₂O₃ nanofluid over a horizontal flat plate with variable magnetic field. Another study from the same year was performed by Umavathi and Shekar [20] and similarly by Ganji and Azimi [21]. They solved Jeffery-Hamel flow problem in the case of nanofluid with magnetic effect. Their solution is mainly based on a semi-numerical-analytical technique called differential transform method (DTM) together with comparative numerical analysis based on Runge-Kutta shooting method (RKSM). Both methods results have excellent agreement. Moreover, they found that Reynolds numbers increase leads to the velocity profile decrease and also increasing Hartmann number may lead to backflow reduction. In addition, they have shown that nano-particles cause to increase fluid velocity value. One year later in 2014, Hatami *et al.* [22] have published their study on Jeffery-Hamel MHD flow of nano-fluid through non-parallel walls by analytical analysis. They used Maxwell-Garnetts (MG) and Brinkman models for calculating the thermal

conductivity and nano-fluid viscosity. They proved by comparison to other semi-analytical methods (DTM and DTM-Padé) that least square method is most accurate. Moreover, they have found that velocity boundary layer thickness decreases with the increase of Reynolds number and nanoparticle volume friction and it increases according to Hartmann number increase. However, the skin friction coefficient was found to be directly dependent on Reynolds number, opening angle and nanoparticle volume friction, while being increasing with these parameters but decreasing with Hartmann number. During the same year, Mao *et al.* [23] have also presented their study on electroosmotic flow (pumping) through a nanopore that traverses an insulating membrane. They have assumed low uniform density of surface charge on the membrane such as the linearized Poisson-Boltzmann equation can be used. The case of membrane with arbitrary thickness was solved numerically by solving the full Poisson-Nernst-Planck-Stokes system of equations using a finite volume method. Another study on MHD Jeffery-Hamel flow with nanoparticle by Hermite-Padé approximation was performed by Alam and Khan [24]. They examined the effects of nanoparticle and magnetic field on the nonlinear Jeffery-Hamel flow by perturbation method and Hermite-Padé approximation while comparing to Adomian decomposition method (ADM). They have discovered that Reynolds number increase leads to reduction of velocity near the walls. Additionally, Hartmann number increase may cause to backflow reduction while high value is being required to decline of backflow which are resulted due to large semi-cone angles or Reynolds numbers. They also obtained that momentum boundary layer thickness increases with increasing nano-particle volume fraction. Additional two more studies that were published during 2014 have been done by Nayak [25] and Deng *et al.* [26]. Nayak has developed solution to Poisson, Nernst-Planck and the Navier-Stokes equations in order to increase the mixing potential of ion species in micro and nano channels with heterogeneous surface potential involved with the discussion on the generation of vertical flow due to the presence of wall heterogeneity at different locations in the channel. He has found that strong recirculation vortices which appear above the heterogeneities generate a strong pressure gradient which increases the mixing performance. Deng *et al.* [26] have examined the problem of ion current rectification link to the concentration gradient of KCl solutions in polyethyleneimine modified glass nanopipettes. One year later in 2015, the laminar axisymmetric flow of nanofluid over a non-linearly stretching sheet with the simultaneous effects of Brownian motion and thermophoretic diffusion of nanoparticles while no-slip boundary conditions were assumed, was presented and solved analytically using homotopy method by Mustafa *et al.* [27]. They have found that Brownian motion effect on the fluid temperature and wall heat transfer rate is insignificant.

Moreover, the nanoparticle volume fraction distribution was found to be negative near the vicinity of the stretching sheet. A study that combines thermal, electroosmotic, magnetic and pressure driven flow of nanofluids in microchannel into one problem was done by Ganguly & Sarkar *et al.* [28] using semi-analytical method. They have found that magneto-hydrodynamic effect reduces the transport of the liquid resulting in gradual reduction of heat transfer. Additionally, increase in nano-particle volume fraction leads to decrease in the rate of heat transfer. According [27]-[28], similar effects has been occurred with the increase in aggregate sizes of the nano-particles. Moreover, they also calculated the total entropy influence while it has been found to be highly effective at the thermally developing region where the nano-particles presence in the base fluid caused to reduction of the total entropy generation in the microchannel and therefore increasing nano-particle volume fraction where higher magnitude of total entropy generation has been observed near the channel walls region. The gradual increase in the liquid temperature with increase in Hartman number results in monotonically increasing values of the Nusselt number. However, at a particular value of Ha, with increasing nanoparticle volume fraction, Nu decreases indicating decrease in the heat transfer rate. Conical nanopore with the considering of electroosmotic flow (EOF) has been investigated analytically by solving a set of coupled Poisson, Nernst-Planck, and Navier-Stokes equations in the context of ionic current rectification (ICR) by Lin *et al.* [29]. During the same year, Laohakunakorn and Keyser [30] and also Moradi *et al.* [31] have presented studies on nano fluid while the first performed an experimental study on electroosmotic flows (EOFs) through conical nano-pores and the latter has made analytical study on the influence of heat transfer on the nonlinear Jeffery-Hamel flow problem in a nanofluid of three types of nano-particles (Cu, Al₂O₃, TiO₂) by considering water as a base fluid in convergent/divergent channel, respectively. The solution was obtained by solving analytically (DTM) and numerically (Runge-Kutta) the nonlinear differential equation. Similarly, like former studies, the authors [30, 31] have found that the influence of solid volume fraction of the nano-particles on the heat transfer and fluid flow parameters is more pronounced when compared with the type of nano-particles. Moreover, they have also found that skin friction coefficient and Nusselt number for Al₂O₃ nano-fluid is highest in comparison to the other two nano-particles while the effect of solid volume fraction on the skin friction coefficient and Nusselt number in convergent and divergent channels are similar. On the other hand, the effects of fluid material parameters on skin friction coefficient and Nusselt number are opposite for the convergent and divergent channels.

The current essay develops and solves analytically and numerically EO and MHD Jeffery-Hamel flow of nano-fluid with wall slip conditions inside wedge channel

based on the author previous studies on non-Newtonian Jeffery-Hamel flow wedge and in micro-channel [32], respectively. This essay continues the studies of Umavathi and Shekar [20], Alam and Khan [24] and Ganguly *et al.* [28].

2 PROBLEM FORMULATION MODEL

Consider a steady two-dimensional flow due to electrical source applied together with uniform magnetic field \mathbf{B} of an incompressible conducting viscous fluid inside a wedge (non-parallel walls) with friction on the walls. The cylindrical polar coordinates (r, θ, z) have been selected to model the flow system as shown in Fig. 1 while the flow intersected in the z axis. It is assumed that the motion is purely radially dependent on r, θ only. Moreover, there are no changes with respect to z axis. The governing equations of motion will be elaborated here as follows. Equation of continuity can be written using Bird *et al.* [33] formulation as:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \rightarrow \frac{\rho_{nf}}{r} \frac{\partial}{\partial r}(ru_r) = 0. \quad (1)$$

while \mathbf{V}, ρ, u_r are the velocity vector, constant fluid density and the radial velocity vector, respectively.

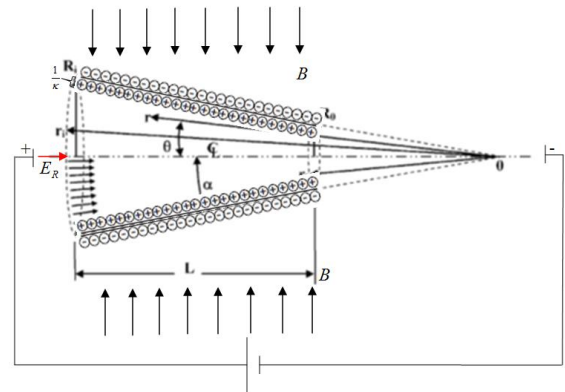


Fig. 1. Electro-magnetic wedge shape flow model illustration. Now, the general equation of momentum can be written by:

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + F_B \quad (2)$$

while F_B and $\boldsymbol{\tau}$ are the body forces and stress vectors, respectively. Body forces are assumed to be generating according to electro-magnetic source ([20], [23], [28]). This source is a combination of Lorentz force (magnetic source) and electrostatic source (uniform electrical field in the radial direction), while gravitational body forces are negligible, based on [34] development, according to:

$$F_B = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B} + F_r = -(\sigma B_0^2 \cos \theta \sin^2 \theta \hat{e}_\theta + \sigma B_0^2 u_r \cos^2 \theta \hat{e}_r) + \rho_e E_r \quad (3)$$

where $\sigma, \mathbf{E}, \mathbf{V}, \mathbf{B}, F_r$ are the constant electrical conductivity, induced electric field, fluid velocity

vector, external magnetic field and the electrical force, respectively. Lorentz force is created due to the flow of a conductive fluid under the influence of a uniform magnetic field. According to Faraday's law, eddy currents are generated by electromotive force due to conductive fluid movement through a magnetic field. As introduced by Thess [35] eddy current creates induced magnetic field based on Ampère's law. The interaction between eddy currents and the total magnetic field results with the opposite Lorentz force (against flow direction). The magnetic force is composed of the magnetic field \mathbf{B} with constant magnetic induction strength B_0 , which is being applied in the transverse direction of the flowing fluid along unidirectional fully developed electroosmotic flow velocity u_r . Moreover, assuming that the magnetic Reynolds number is sufficiently small, then the induced magnetic and electric fields can be neglected. In addition, since there are no electrical fields in the z axis direction (inside the sheet) only in the radial electric field, than no magnetic force can be generated in the (\hat{r}, θ) directions out of the forces mentioned in Eqs. (2)-(3). According to Ganguly *et al.* [28], the electroosmosis driving force part is induced by the interaction of an applied electric field in

the nano-fluid effective kinematic viscosity, the nano-fluid effective density, the base fluid density and the solid particles density, respectively. Integrative systems that combine between electric and magnetic forces including thermal effects are discussed by ([28], [36]). The Navier-Stokes equations in polar coordinates form ([20] - [21], [24]) are:

while the momentum equations are derived by using the fully cylindrical coordinates flow as developed by Membrado and Pacheco [37]. One step before completing the model formulation is to determine the net charge density ρ_e . Using Poisson equation together with analogy comprehension with Ganguly *et al.* [28] studies, the following equation for the net charge is obtained in the tangential direction which is perpendicular to the wedge wall (in Cartesian coordinates it is represented in the perpendicular y direction):

$$\rho_e(\theta) = -\kappa^2 \varepsilon \psi_w \frac{\cosh(\kappa\theta)}{\cosh(\kappa\alpha)} \tag{9}$$

according to $\frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} = -\frac{\rho_e}{\varepsilon}, \psi(\theta=\alpha) = \psi_w, \frac{\partial \psi}{\partial \theta}(\theta=0) = 0$. While κ is defined as Debye length and is calculated by

$$\begin{aligned} \hat{r}: \rho_{nf} u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{\partial P}{\partial r} - \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} \right] + F_r \\ \rho_{nf} u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = -\frac{\partial P}{\partial r} + 2 \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \mu_{nf} \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right] - \sigma B_0^2 u_r \cos^2 \theta + \rho_e E_r \end{aligned} \tag{4}$$

while shear rate components behave according the assumptions that $u_\theta = u_z = 0, \frac{\partial(\quad)}{\partial z} = 0$:

$$\tau_{rr} = -p + 2\mu_{nf} \frac{\partial u_r}{\partial r}, \tau_{\theta\theta} = -p + 2\mu_{nf} \frac{u_r}{r}, \tau_{r\theta} = \frac{\mu_{nf}}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \tag{5}$$

The equation of momentum in the tangential axis is:

$$\begin{aligned} \hat{\theta}: -\frac{1}{\rho_{nf} r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \left[\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right] = 0 \\ \frac{1}{\rho_{nf} r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \frac{1}{\rho_{nf} r} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{2}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} u_r - \frac{2\nu_{nf}}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + u_r \frac{\sigma B_0^2}{\rho_{nf}} \cos \theta \sin \theta = 0 \end{aligned} \tag{6}$$

the radial direction E_r and the net charge density ρ_e in the EDL (electric double layer). The viscosity term is expressed using the following components [28]:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}, \nu_{nf} = \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}, \rho_{nf} = \rho_f (1-\phi) + \rho_s \phi \tag{8}$$

While $\phi, \nu_{nf}, \rho_{nf}, \rho_f, \rho_s$ are the solid volume fracture,

$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\varepsilon k_B T}{2e^2 z^2 n_\infty}}$, where n_∞ and z are the bulk number concentration and the valence of ions, respectively. ε, e, k_B, T are the electric permittivity, elementary charge, Boltzmann constant and the absolute temperature, respectively. Additionally, κR_0 is

$$-\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2}{\rho_{nf}} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \nu_{nf} \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \right] - \frac{\sigma B_0^2}{\rho_{nf}} u_r \cos^2 \theta - \kappa^2 \varepsilon \psi_w \frac{\cosh(\kappa\theta)}{\cosh(\kappa\alpha)} \frac{E_r}{\rho_{nf}} - u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} = 0 \tag{7}$$

the electrokinetic parameter that represents the ratio of the half channel height (change with angle and radius) to the EDL thickness. Hence, after inserting equation (8)

variety of non-Newtonian fluids like elasto-viscoplastic and structural fluids [32], [38]. A third condition is joined to the other two conditions (13), which

Differentiating equation (9) along the tangential direction leads to:

$$-\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 P}{\partial r \partial \theta} + \frac{2}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r \partial \theta} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{2}{\rho_{nf}} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial \theta^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} \right] + v_{nf} \left[\frac{\partial^3 u_r}{\partial r^2 \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 u_r}{\partial \theta^3} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{u_r}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] - \frac{\sigma B_0^2}{\rho_{nf}} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \cos^2 \theta + \frac{\sigma B_0^2}{\rho_{nf}} u_r \sin 2\theta - \frac{\kappa^3 \varepsilon \psi_w E_r}{\rho_{nf} \cosh(\kappa \alpha)} \sinh(\kappa \theta) - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \frac{\partial u_r}{\partial r} - u_r \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} = 0 \tag{10}$$

Multiplying equation (7) by r together with differentiation performance along the radial direction yields:

$$\frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 P}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} - \frac{2}{\rho_{nf} r} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r \partial \theta} u_r + \frac{2}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} u_r - \frac{2}{\rho_{nf} r} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \dots - \frac{2v_{nf}}{r} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{2v_{nf}}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{2}{\rho_{nf} r} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + u_r \frac{\sigma B_0^2}{2\rho_{nf}} \sin 2\theta + \frac{\partial u_r}{\partial r} \frac{\sigma B_0^2}{2\rho_{nf}} r \sin 2\theta = 0 \tag{11}$$

Therefore by adding equation (11) to equation (10), the following nonlinear differential equation is obtained:

$$\frac{2}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r \partial \theta} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial \theta^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} + \frac{1}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r^2} \right] + v_{nf} \left[\frac{\partial^3 u_r}{\partial r^2 \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^3 u_r}{\partial \theta^3} - \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \right] - \frac{2}{\rho_{nf} r} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r \partial \theta} u_r - \frac{2}{\rho_{nf} r} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \frac{\partial u_r}{\partial r} - u_r \frac{\partial^2 u_r}{\partial r \partial \theta} - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{\sigma B_0^2}{\rho_{nf}} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} \cos^2 \theta + \dots + 3 \frac{\sigma B_0^2}{2\rho_{nf}} u_r \sin 2\theta + \frac{\partial u_r}{\partial r} \frac{\sigma B_0^2}{2\rho_{nf}} r \sin 2\theta - \frac{\kappa^3 \varepsilon \psi_w E_r}{\rho_{nf} \cosh(\kappa \alpha)} \sinh(\kappa \theta) = 0 \tag{12}$$

into (5), we have:

With the appropriate slip boundary conditions as follows:

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} (\theta = \pm \alpha) = \mp m u (\theta) \tag{11}$$

while $m \geq 0$ is the friction coefficient factor. These conditions represent the relative slip friction between the fluid and the wall. On the one hand, a smooth boundary is described by $m = 0$. On the other hand, perfectly rough wall is obtained for $m = 1$. It is based on recent research studies about Mises effective stress and attributed to both Tresca and Prandtl. Similar studies on wall friction condition (12) are available for a

supplements [32]:

$$Q = \int_{(A)} u_r dA = - \int_{-\alpha}^{\alpha} u_r r d\theta \tag{15}$$

while A represents the cross sectional radial surface area of the flow field with the element aread $A = r d\theta$, within the deformation zone. α represents the wedge semi angle where flow field domain is confined between two rigid rough smoothing walls ($\theta = \pm \alpha$) that enables slip condition. Q is the steady state planar flow rate. In order to simplify the model, the following transformation will be applied using relation (1) as shown in Fig. 1:

$$u_r = -Q \frac{f(\theta)}{r} \tag{16}$$

Thus the nonlinear differential equation (12) takes the following form after substituting (15) and dividing it by the density ρ_{nf} :

$$\frac{2Q}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r \partial \theta} f' + \frac{Q}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} f'' - \frac{Q}{\rho_{nf} r^3} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial \theta^2} f' - \frac{Q}{\rho_{nf} r^3} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} f'' - \frac{1}{\rho_{nf}} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial \theta} \left[\frac{Q}{r^3} f'' + \frac{4Q}{r^3} f' \right] - v_{nf} \left[\frac{4Q}{r^3} f'' + \frac{Q}{r^3} f''' \right] + \dots + \frac{2Q}{\rho_{nf} r^2} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r \partial \theta} f' - \frac{2Q}{\rho_{nf} r^3} \frac{\partial \mu_{nf}}{\partial r} f'' + 2 \frac{Q^2}{r^3} f f'' + \frac{Q}{\rho_{nf} r} \frac{\partial^2 \mu_{nf}}{\partial r^2} f' + \frac{Q \sigma B_0^2}{\rho_{nf} r} f' \cos^2 \theta - Q \frac{\sigma B_0^2}{\rho_{nf} r} f \sin 2\theta - \frac{\kappa^3 \varepsilon \psi_w E_r}{\rho_{nf} \cosh(\kappa \alpha)} \sinh(\kappa \theta) = 0 \tag{12}$$

Applying the assumption of constant fluid viscosity $\mu_{nf} = \text{constant}$ which means that also $\mu_f = \text{constant}$ according to (4), leads to the following non-linear differential equation:

$$2 \frac{Q^2}{r^3} f f'' - v_{nf} \left[\frac{4Q}{r^3} f'' + \frac{Q}{r^3} f''' \right] + \frac{Q \sigma B_0^2}{\rho_{nf} r} f' \cos^2 \theta - \frac{Q \sigma B_0^2}{r \rho_{nf}} f \sin 2\theta - \frac{\kappa^3 \varepsilon \psi_w E_r}{\rho_{nf} \cosh(\kappa \alpha)} \sinh(\kappa \theta) = 0 \tag{13}$$

Multiplying Eq. (17) by r^3 and dividing it by Q and v_{nf} , yields:

$$f''' + 4f'' - 2 \text{Re}(1 - \phi)^{2.5} \left[(1 - \phi) + \frac{\rho_s}{\rho_f} \phi \right] f f'' - Ha (f' \cos^2 \theta - f \sin 2\theta) (1 - \phi)^{1.25} + c_1 \sinh(\kappa \theta) = 0 \tag{14}$$

Where $c_1 = \frac{\varepsilon \psi_w E_r (\kappa r)^3}{\kappa Q \cosh(\kappa \alpha) \mu_f}$. In addition, Reynolds and Hartmann numbers are defined ([34]) by

$$Ha = (B_0 r)^2 \frac{\sigma}{\mu_f}, Re = \frac{Q \rho_f}{\mu_f}, \text{ respectively. Note that } c_1 \text{ and } Ha \text{ numbers are dependent on } r. \text{ In order to cancel this dependency and to have similarity solutions which dependent only on the wedge semi angle } \theta \text{ one can assume that } E_r \text{ or } \psi_w \text{ or } \varepsilon \propto \frac{1}{r^3} \text{ and } B_0 \text{ or } \sigma \propto \frac{1}{r^2}. \text{ Accordingly,}$$

$$Ha = \frac{\sigma_0 B_0^2}{\mu_f}, c_1 = \frac{\varepsilon_0 \psi_w E_r \kappa^2}{Q \cosh(\kappa \alpha) \mu_f} \tag{17}$$

While σ_0, ε_0 are constants. Integrating Eq. (18) along θ direction leads to the following equilibrium:

$$f'' + [4 - Ha(1 - \phi)^{1.25} \cos^2 \theta] f - 2 Re(1 - \phi)^{2.5} \left[(1 - \phi) + \frac{\rho_s}{\rho_f} \phi \right] f^2 + c_1 \cosh(\kappa \theta) = d \tag{18}$$

with $\int f' \cos^2 \theta - f \sin 2\theta d\theta = f \cos^2 \theta, \cosh(\kappa \theta) = \frac{e^{\kappa \theta} + e^{-\kappa \theta}}{2}$ and d is the integration constant.

Rearrangement of equation (20) members leads to one non differential equation which depends only on θ :

$$f'' + [4 - Ha(1 - \phi)^{1.25} \cos^2 \theta] f - 2 Re(1 - \phi)^{2.5} \left[(1 - \phi) + \frac{\rho_s}{\rho_f} \phi \right] f^2 = d - c_1 \frac{e^{\kappa \theta} + e^{-\kappa \theta}}{2} \tag{19}$$

Based on previous studies, equation (21) can be treated as particular case of the general equation obtained by the author (Nagler – observe equation no. 25 there, [32]). In this stage we will try to solve Eq. (21) analytically. Suppose that $f^2 \propto f$ and $0 < \theta \leq 20^0$, then Eq. (21) will behave according the following form:

$$f'' + (4 - HaJ_2 - 2J_1) f = d - c_1 \frac{e^{\kappa \theta} + e^{-\kappa \theta}}{2}, \tag{20}$$

While

$$\cos^2 \theta \propto 1, J_1 = 2(1 - \phi)^{2.5} Re \left[(1 - \phi) + \frac{\rho_s}{\rho_f} \phi \right], J_2 = (1 - \phi)^{1.25}. \tag{21}$$

Equation (22) solution will be done by two stages – homogenous and particular, according to:

$$f_h = \begin{cases} a_1 e^{\sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1} \theta} + a_2 e^{-\sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1} \theta}, & 4 - HaJ_2 - 2J_1 > 0 \\ a_1 \cos(\sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1} \theta) + a_2 \sin(\sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1} \theta), & 4 - HaJ_2 - 2J_1 < 0 \end{cases} \tag{22}$$

While a_1, a_2 are constants. The particular solution of equation (22) is:

$$f_p = \frac{d}{4 - HaJ_2 - 2J_1} - \frac{c_1}{2} \frac{e^{\kappa \theta} + e^{-\kappa \theta}}{4 - HaJ_2 - 2J_1 + \kappa^2} \tag{23}$$

The final approximate solution for small values of wedge semi angle over the range $0^0 < \theta \leq 20^0$ is

$$f = f_h + f_p = \begin{cases} \text{IF } 4 - HaJ_2 - 2J_1 > 0: \\ a_1 e^{\sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1} \theta} + a_2 e^{-\sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1} \theta} + \frac{d}{4 - HaJ_2 - 2J_1} - \frac{c_1}{2} \frac{e^{\kappa \theta} + e^{-\kappa \theta}}{4 - HaJ_2 - 2J_1 + \kappa^2} \\ \text{IF } 4 - HaJ_2 - 2J_1 < 0: \\ a_1 \cos(\sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1} \theta) + a_2 \sin(\sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1} \theta) + \frac{d}{4 - HaJ_2 - 2J_1} - \frac{c_1}{2} \frac{e^{\kappa \theta} + e^{-\kappa \theta}}{4 - HaJ_2 - 2J_1 + \kappa^2} \end{cases} \tag{24}$$

Now, in order to determine the constants a_1, a_2 and d , the following transformed conditions (13) – (14) should be applied on relation (26) according to:

$$f'(\theta = \pm \alpha) = \mp mf(\theta = \pm \alpha) \text{ or } \begin{cases} f'(\alpha) = -mf(\alpha) \\ f'(0) = 0 \end{cases} \tag{25}$$

Due to flow field symmetry assumption, both conditions can simply be written by the right column. The normalized transformed flow rate condition (14) is in the form:

$$\int_{-\alpha}^{\alpha} f d\theta = 1 \tag{26}$$

Hence, the final solution coefficients are:

IF $4 - HaJ_2 - 2J_1 > 0$:

$$a_1 = a_2 = -\frac{m\left(\frac{d}{T_1^2} - T_5\right) - \frac{\kappa c_1}{2} T_2}{mT_4 + T_1 T_3}, d = \left(\frac{1}{2} + \frac{T_2 c_1}{4\kappa} - \frac{mT_5 + \frac{\kappa}{2} c_1 T_2}{mT_4 + T_1 T_3} \frac{T_3}{T_1}\right) \left(\frac{\alpha}{T_1^2} - \frac{m/T_1^2}{mT_4 + T_1 T_3} \frac{T_3}{T_1}\right)^{-1} \tag{27}$$

IF $4 - HaJ_2 - 2J_1 < 0$:

$$a_1 = \frac{\frac{\kappa c_1}{2} T_2 - m\left(\frac{d}{T_1} - T_5\right)}{m \cos(T_1 \alpha) - T_1 \sin(T_1 \alpha)}, a_2 = 0, d = \frac{\frac{T_1^2}{2\alpha} \left(1 + \frac{T_2 c_1}{2\kappa}\right) - \frac{\kappa c_1 T_2 + 2mT_5}{2T_6 \alpha} T_1 \sin(T_1 \alpha)}{1 + \frac{m}{T_1 T_6 \alpha} \sin(T_1 \alpha)}$$

Where,

$$T_1 = \sqrt{4 - HaJ_2 - 2J_1}, T_2 = \frac{e^{\kappa\alpha} - e^{-\kappa\alpha}}{T_1^2 + \kappa^2}, T_3 = e^{T_1 \alpha} - e^{-T_1 \alpha}, T_4 = e^{T_1 \alpha} + e^{-T_1 \alpha}, T_5 = \frac{c_1}{2} \frac{e^{\kappa\alpha} + e^{-\kappa\alpha}}{T_1^2 + \kappa^2}, \tag{28}$$

$$T_6 = m \cos(T_1 \alpha) - T_1 \sin(T_1 \alpha)$$

Suggested functions based on the author relevant mathematical knowledge on micro fluid flow [32] will be introduced here. Parabolic approximation which fulfills boundary conditions (27)-(28) is brought as follows [32]:

$$f_1(\theta) \approx b_1(1 - b_2 \theta^2) = \frac{1 - \frac{m}{2\alpha + m\alpha^2} \theta^2}{2\alpha - \frac{2}{3} \frac{m\alpha^3}{2\alpha + m\alpha^2}} = \frac{2\alpha + m\alpha^2 - m\theta^2}{4\alpha^2 + \frac{4}{3} m\alpha^3} \tag{31}$$

$$b_1 = \frac{1}{2\alpha - 2b_2 \frac{\alpha^3}{3}} = \frac{1}{2\alpha - \frac{2}{3} \frac{m\alpha^3}{2\alpha + m\alpha^2}}, b_2 = \frac{m}{2\alpha + m\alpha^2}$$

while $\alpha \neq 0$.

In the next section, comparison will be performed and discussed between approximate analytical solutions and literature results.

3 RESULTS & DISCUSSION

In this section parametric investigation based on Eq. (29) through illustrative results will be presented and discussed. Initially, suppose that the following parameters are considered

$$\alpha = 2.5^\circ, \phi = 0, Re = 250, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm}\right], Ha = 50, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 10^4, \psi_w = -50[mV], E = 30 \left[\frac{kV}{m}\right], \epsilon_0 = -8.85 \cdot 10^{-12} [F/m]$$

Seemingly, the normalized velocity (f) was found to decrease gradually with the tangential direction progress as appear in Fig. 1. Moreover, friction coefficient (m) increase leads to normalized velocity profile values decrease as shown in Fig. 1. Many studies are usually using the no-slip boundary condition. Here, the case where friction coefficient (m) value becomes large enough to represent "infinity" is for $m = 10^6$ and

condition (27) becomes $f(\alpha) = 0$. The obtained solution has full compatibility with [24], [28] and Dib *et al.* [39]. The opposite extreme case where $m = 0$ or $f'(\alpha) = 0$ is illustrated in Fig. 2 by horizontal line parallel to the θ axis while good agreement has been achieved [32]. Further explanation for this phenomenon will be brought in the next section. However, increase of wedge semi angle value leads to increase of the normalized velocity profile as appear in Fig. 3. Concentrating on the solid to fluid ratio ρ_s / ρ_f teaches us that the normalized velocity profile gets higher value as long as the fracture increases as illustrated in Fig. 4. Initial observation at two distinguished characteristics of the flow: Reynolds (Re) and Hartmann (Ha) numbers show that an increase in these numbers raises the normalized velocity function values as shown in Figs. 5-6. In addition, solid volume fraction coefficient (ϕ) increase is accompanied with normalized velocity profile result increase.

Next, the discussion will revolve around the comparison between the approximate analytical solution (29) and suggested approximate parabolic solution (31). In case where flow effects (including inertia, magnetic, electrically, etc.) can be neglected, both solutions are coincided for each value of the wedge semi angle and friction coefficient as illustrated in Fig. 7. (a-b), respectively. In case where more effects are gradually being considered, a slight difference is emerged, but the most dramatic change between solutions occurs when solid to fluid ratio ρ_s / ρ_f gets significant value as shown in Fig. 9.

Next section will discuss on the influence of small friction coefficient values through special cases.

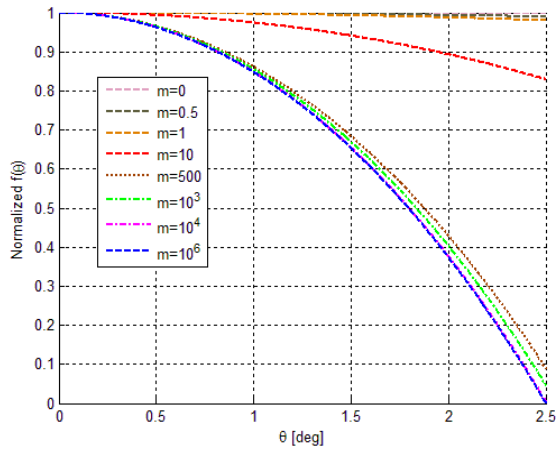


Fig. 2. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of friction coefficient (m) while

$$\alpha = 2.5^\circ, \phi = 0, Re = 250, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], Ha = 50, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 10^4.$$

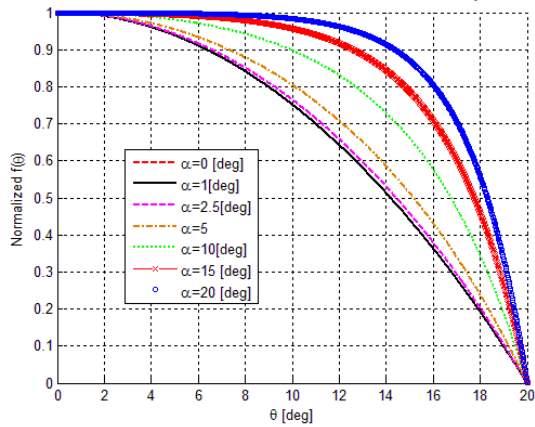


Fig. 3. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of semi wedge angle (α) while

$$\phi = 0, Re = 250, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], Ha = 50, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 10^4, m = 10^6.$$

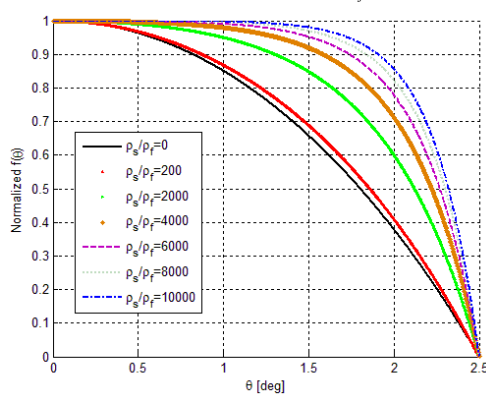


Fig. 4. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of solid to fluid fraction coefficient ρ_s / ρ_f while

$$\alpha = 2.5^\circ, \phi = 0.01, Re = 250, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], Ha = 50, m = 10^6$$

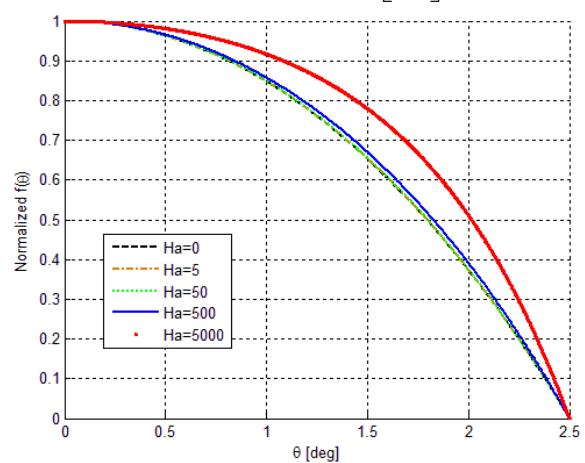


Fig. 5. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of Hartman number (Ha) while

$$\alpha = 2.5^\circ, \phi = 0, Re = 250, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], m = 10^6, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 10^4.$$

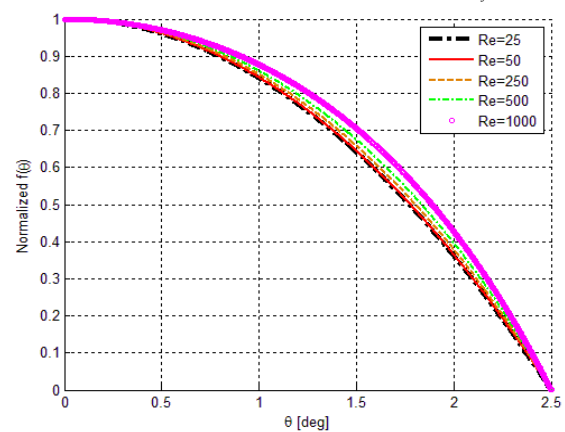


Fig. 6. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of Reynolds number (Re) while

$$\alpha = 2.5^\circ, \phi = 0, Ha = 50, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], m = 10^6, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 10^4.$$

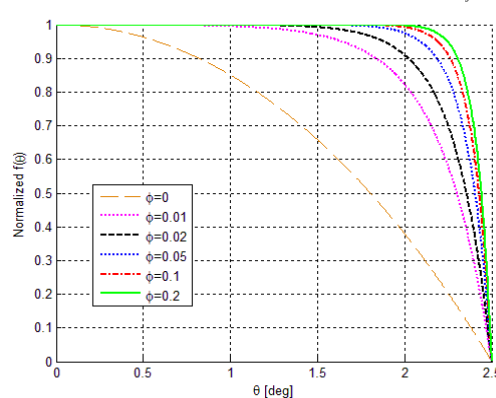


Fig. 7. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of solid volume fraction (ϕ)

while

$$\alpha = 2.5^0, Re = 250, Ha = 50, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], m = 10^6, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 10^4$$

Suppose

$$\alpha = 20^0, \phi = 0, Re = 0, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], Ha = 0, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 0, \psi_w = -50[mV]$$

that

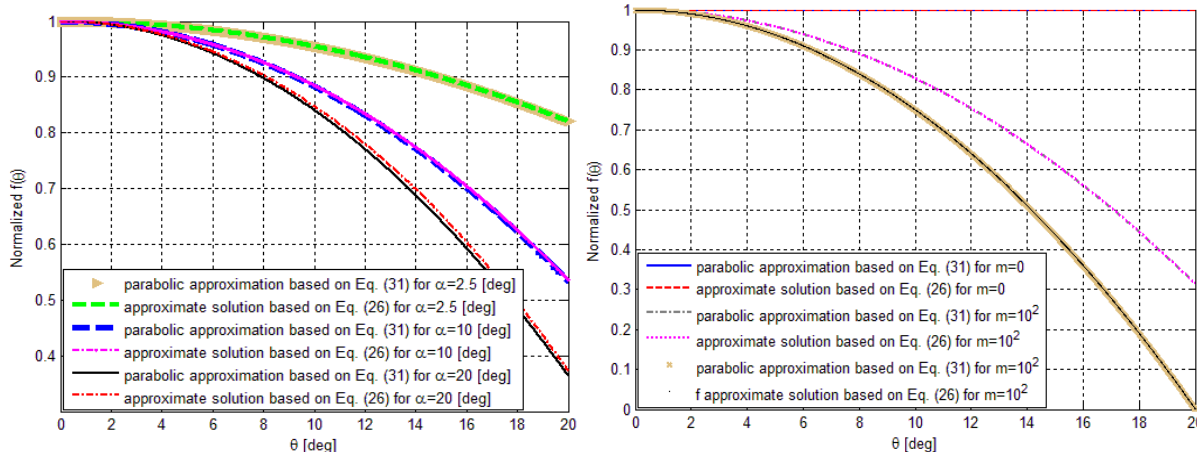


Fig. 8. Normalized velocity $f(\theta)$ comparison between Eqs. (29) and (31) for various values of a. wedge semi angle (α) while $m = 10^1$. where $\phi = 0, Re = 0, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], Ha = 0, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 0$. b. friction coefficient (m) while

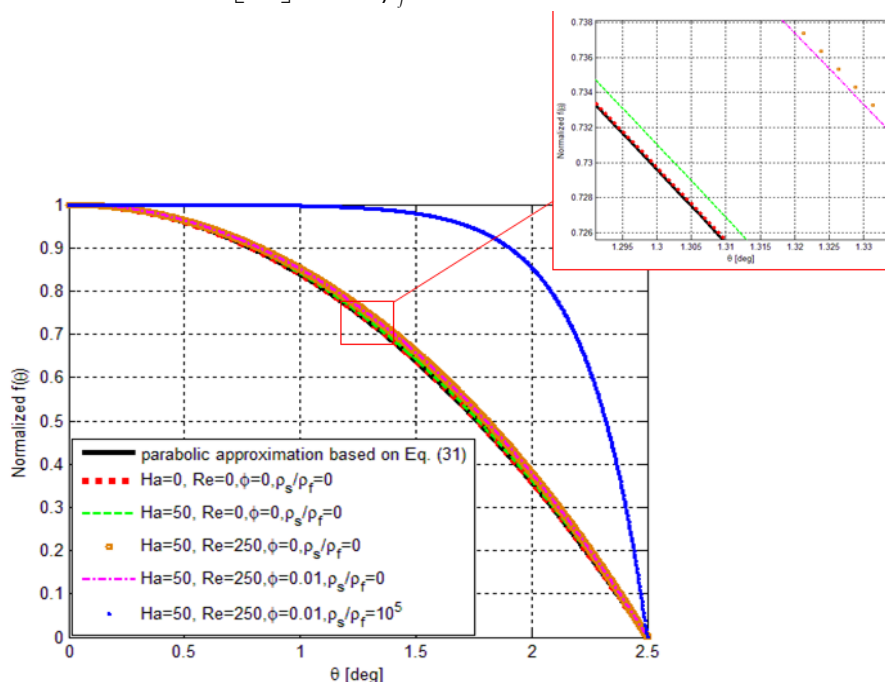


Fig. 9. Normalized velocity $f(\theta)$ comparison between Eqs. (29) and (31) based on gradual parametric variation (evolution) while $\alpha = 2.5^0, m = 10^6$ are constants through process.

4 DISTINGUISH FLUID BEHAVIOR EXAMINATION DUE TO SMALL FRICTION COEFFICIENT VALUES

In this section three unprevail distinguished cases will be brought for discussion. These cases represent the fluid mechanics complexity and may be used for further future studies investigations. Firstly, the case where friction coefficient becomes zero will be analyzed.

. As a result of substitution into Eq. (29), the horizontal line is slightly varied with the electrical field as shown in Fig. 10. In conclusion, the increase of the electrical field causes to the normalized velocity to decrease slightly gradually while the wedge semi angle was chosen to obtain maximum value ($\alpha = 20^0$) such as this phenomenon will be identified clearly. The second

phenomenon that will be introduced shows that for specific parameters choice

$$\left(m = 0.5, \phi = 0.03, Re = 25, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], Ha = 5, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 2000, \psi_w = -50[mV], E_r = 30 \left[\frac{kV}{m} \right] \right)$$

the optimal normalized velocity is not determined by choosing specific wedge semi angle but may vary along the course and optimal value may be achieved in some point over the tangential direction for other wedge semi angle than initially specified as appear in Fig. 11. The last case that will be brought here concerns the effect of friction coefficient (m) variation on the normalized velocity profile for different values of wedge semi angle (α) with the following parameters choice

$$\left(\phi = 0.02, Re = 250, \kappa = 1000 \left[\frac{1}{nm} \right], Ha = 50, \frac{\rho_s}{\rho_f} = 10^4, \psi_w = -50[mV], E_r = 150 \left[\frac{kV}{m} \right] \right)$$

One can infer from the friction coefficient variation that the difference between the normalized velocity profiles for different values of α is decreased as long as the friction coefficient is increased as presented in Fig. 12 (a-d). Moreover, choosing large values of m leads to profiles convergence. For instance, in case where the friction coefficient represents "infinity" ($m = 10^6$) the profiles are coincided as appear in Fig. 12. (e).

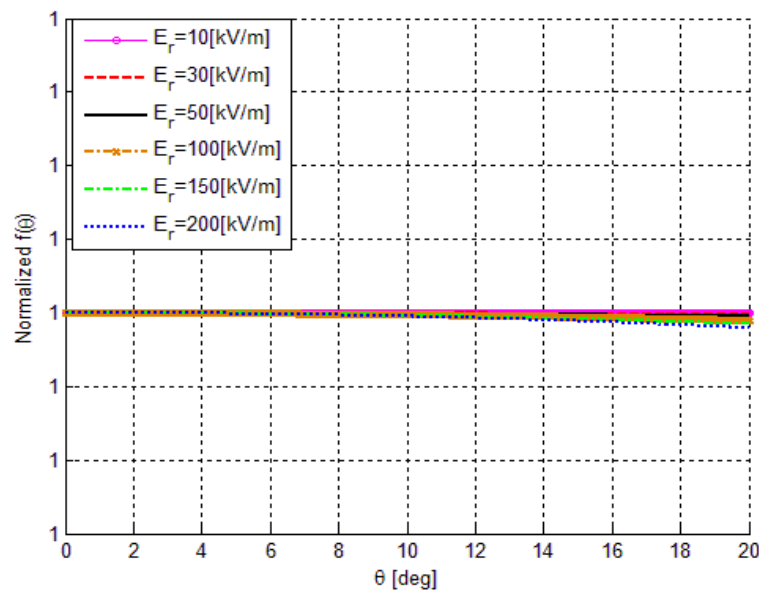


Fig. 10. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of the electrical field (E_r).

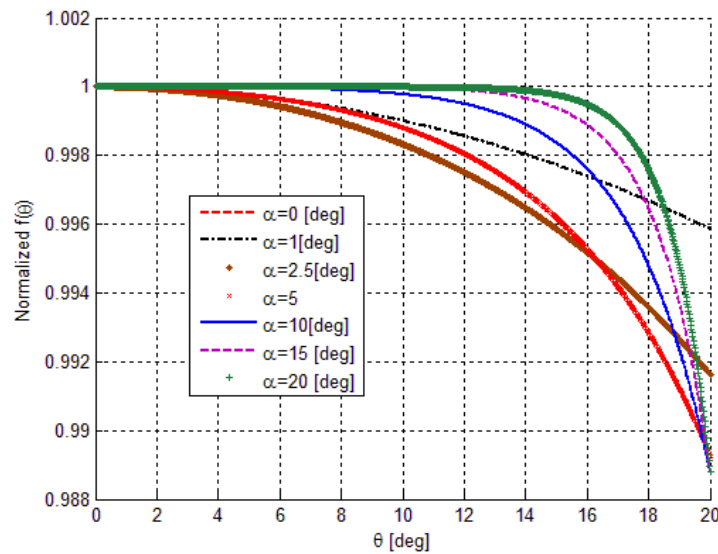


Fig. 11. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of the wedge semi angle (α).

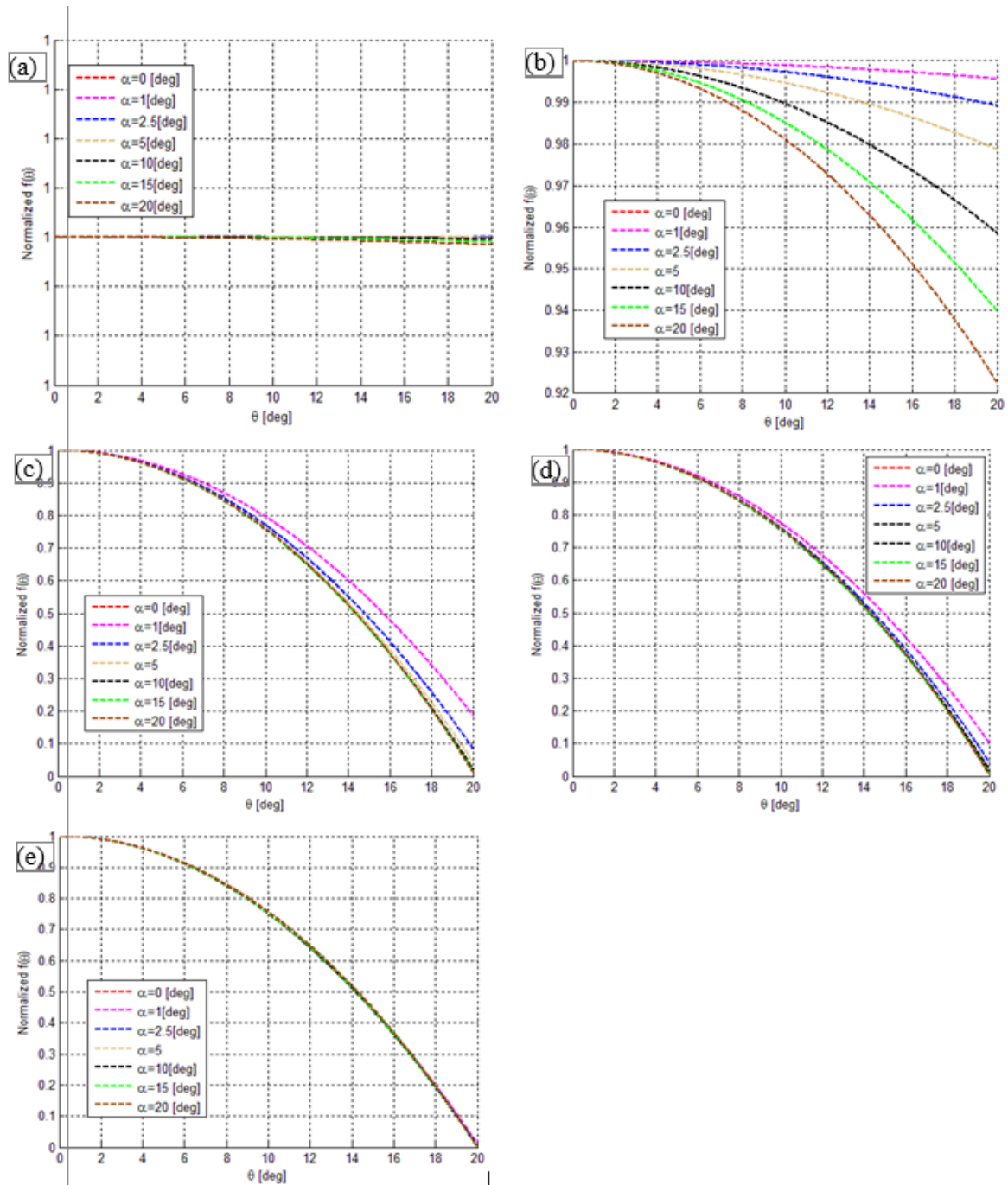


Fig. 12. Normalized velocity $f(\theta)$ for various values of the wedge semi angle (α) in accordance to the following cases:
a. $m = 0$. **b.** $m = 0.5$. **c.** $m = 500$. **d.** $m = 10^4$. **e.** $m = 10^6$.

5. CONCLUSIONS

In this essay, a model of combined MHD and electroosmotic Jeffery–Hamel flow of nano fluid type inside a wedge (inclined walls) with non-linear viscosity and wall friction was derived and expressed by one nonlinear ordinary differential equation with appropriate boundary conditions based on similarity relations. The obtained equation can be solved analytically by assuming that $f^2 \ll f$ and $0 < \theta \leq 20^0$. Moreover, the

obtained analytic solution was compared to simple parabolic approximation while excellent agreement was found. Although it was found that in case where more effects are gradually being considered, a slight difference is emerged, but the most dramatic change between solutions occurs when solid to fluid ratio ρ_s / ρ_f gets significant value. In addition, literature results were also being compared, while solutions were

found to have suitable match in the quantitatively and qualitatively aspects.

Moreover, analytical solution parametric investigation was performed for specific parameters choice. It was found that the normalized velocity (f) was decreased gradually with the tangential direction progress and/or with friction coefficient (m) increase. However, the normalized velocity profile gets higher values as long as the solid to fluid ratio ρ_s / ρ_f increases. Additionally, Reynolds (Re), Hartmann (Ha) and solid volume fraction coefficient (ϕ) increase (separately or all together) have raised the normalized velocity function values.

Finally, three unprevail distinguished cases were introduced to understand flow complexity. It was found that electrical field magnitude effect is being significant, especially for small friction coefficient values and for high wedge semi angle. In addition, the combination between small friction coefficient values including small parameter flow values (Re and Ha numbers) and high electrically field may lead to un-optimized course of normalized velocity profile. The last case that was examined deals with friction coefficient (m) variation effect on the normalized velocity profile for different values of wedge semi angle (α) with high electric field for specific parameters choice. One can infer from the variation of friction coefficient that the difference between the normalized velocity profiles for different values of α decreases as long as the friction coefficient increases. Moreover, choosing large values of m leads to profiles convergence such as in case where the friction coefficient represents "infinity" ($m = 10^6$) the profiles are coincided.

REFERENCES

- Rice C. L., Whitehead R., 1965, Electrokinetic Flow in a Narrow Cylindrical, *The Journal of Physical Chemistry*, **69**, 11, 4017-4024
- Sørensen T. S., Koefoed J., 1974, Electrokinetic Flow in a Narrow Cylindrical Capillary, *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 2*(70): 665-675
- Levine S., Marriott J. R., Robinson K., 1975, Theory of electrokinetic flow in a narrow parallel-plate channel, *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 2*(71): 1-11
- Pu Q., Yun Q.J., Temkin H., Liu S., 2004, Ion Enrichment and Ion-Depletion Effect of Nanochannel Structures, *Nano Letters*, **4**(6): 1099-1103
- Plečis A., Schoch R. B., Renaud P., 2005, Ionic Transport Phenomena in Nanofluidics: Experimental and Theoretical Study of the Exclusion-Enrichment Effect on a Chip. *Nano Lett.*, **5**(6): 1147-1155
- Byun C. K., Wang X., Pu Q., Liu S., 2007, An Electroosmosis-Based Nanopipettor, *Anal Chem.*, **79**(10): 3862-3866
- Berrouche Y., Avenas Y., Schaeffer C., Wang P., Chang H. C., 2008, Optimization of High Flow Rate Nanoporous Electroosmotic Pump, *ASME. J. Fluids Eng.* **130**(8): 081604-081604-7
- Chen L., Li Q., Lee s., Choo J., 2008, Development of an Electroosmotic Pump Using Nanosilica Particle Packed Capillary. *Sensors Journal, IEEE*, **8**(5): 488-494.
- Chen Y. F., M. C. Li, Y. H. Hu, W. J. Chang and C. C. Wang, 2008, Low-voltage electroosmotic pumping using porous anodic alumina membranes, *Microfluid Nanofluid*, **5**: 235-244
- Seiler M., Kirby B., Computational simulation of electrohydrodynamic systems pertaining to micro and nano scale fluid flow phenomenon, Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference 2008 Boston
- Ai Y., Zhang M., Joo S. W., Cheney M. A., Qian S., 2010, Effects of Electroosmotic Flow on Ionic Current Rectification in Conical Nanopores, *J. Phys. Chem. C*, **114** (9): 3883-3890
- Piruska A., Gong M., Sweedler J. V., Bohn P. W., 2010, Nanofluidics in chemical analysis, *Chem. Soc. Rev.*, **39**: 1060-1072
- Aparajita A., Satapathy A. K., 2012, Numerical analysis of heat transfer characteristics of combined electroosmotic and pressure-driven fully developed flow of power law nanofluids in microchannels, 3rd European Conference on Microfluidics - 2012 - Heidelberg, Germany, 1-10
- Avsec J., 2012, Electrokinetic and nanofluid slip flow in rectangular and circular microchannels regarding constant heat flux, *Nanotechnology (IEEE-NANO)*, 12th IEEE Conference on Nanotechnology, 1-6
- Imani A. A., Rostamian Y., Ganji D. D., Rokni H. B., 2012, Analytical Investigation of Jeffery-Hamel Flow with High Magnetic Field and Nano Particle by RVIM. *IJE TRANSACTIONS C: Aspects*, **25**(3): 249-256
- Kurtoglu E., Bilgin A., Şeşen M., Mısırlıoğlu B., Yıldız M., Funda H., Acar Y., Kosar A., 2012, Ferrofluid actuation with varying magnetic fields for micropumping applications, *Microfluidics and Nanofluidics*, **13**(4): 683-694
- Ahmed S., Mahdy A., 2012, Natural Convection Flow and Heat Transfer Enhancement of a Nanofluid past a Truncated Cone with Magnetic Field Effect. *World Journal of Mechanics*, **2**(5): 272-279
- Khidir A. A., 2013, A New Spectral-Homotopy Perturbation Method and Its Application to Jeffery-Hamel Nanofluid Flow with High Magnetic Field, *Journal of Computational Methods in Physics*, 1- 10
- Sadoughi K., Hosseini M., Shakeri F., Azimi M., 2013, Analytical Simulation of MHD Nanofluid Flow over the Horizontal Plate, *Frontiers in Aerospace Engineering*, **2**(4): 242 - 246
- Umavathi J. C., Shekar M., 2013, Effect of MHD on Jeffery-Hamel Flow in Nanofluids by Differential Transform Method, *Int. Journal of Engineering Research and Applications*, **3**(5): 953-962.
- Ganji D. D., Azimi M., 2013, Application of DTM on MHD Jeffery Hamel problem with nanoparticles, *U.P.B. Sci Bull. Ser. A*, **75**: 223 - 230

22. Hatami M., Sheikholeslami M., Hosseini M., Ganji D. D., 2014, Analytical investigation of MHD nanofluid flow in non-parallel walls, **Journal of Molecular Liquids**, **194**: 251-259
23. Mao M., Sherwood J. D., Ghosal S., 2014, Electroosmotic flow through a nanopore, **J. Fluid Mech.**, 749: 1 – 16
24. Alam M. S., and Khan M. A. H., 2014, Analysis of MHD Jeffery-Hamel flow with nanoparticle by Hermite- Padé approximation, **Journal of Advanced Science and Engineering Research**, 4(2): 103-117
25. Nayak A. K., 2014, Enhancement of flow mixing in micro and nano. **ANZIAM J. EMAC2013**, 55: C47-C63
26. Deng X. L., Takami T., Son J. W., Kang E. J., Kawai T., Park B. H., 2014, Effect of concentration gradient on ionic current rectification in polyethyleneimine modified glass nano-pipettes. **Scientific Reports** 4, 4005, 1-8
27. Mustafa M., Khan J. A., Hayat T., Alsaedi A., 2015, Analytical and numerical solutions for axisymmetric flow of nanofluid due to non-linearly stretching sheet, **International Journal of Non-Linear Mechanics**, 71: 22-29
28. Ganguly S., Sarkar S., Hota T. K., Mishra M., 2015, Thermally developing combined electroosmotic and pressure-driven flow of nanofluids in a microchannel under the effect of magnetic field, **Chemical Engineering Science**, 126:, 10-21
29. Lin D. H., Lin C. Y., Tseng S., Hsu J. P., 2015, Influence of electroosmotic flow on the ionic current rectification in a pH-regulated, conical nanopore, **Nanoscale.**, **7**: 14023–14031
30. Laohakunakorn N., Keyser U. F., 2015, Electroosmotic flow rectification in conical nanopores, **Nanotechnology**, 26: 1-9
31. Moradi A., Alsaedi A., Hayat T., 2015, Investigation of Heat Transfer and Viscous Dissipation, **Thermal Science**, 19(2): 563-578
32. Nagler J., Durban D., Khosid S., 2013, On Planar Radial Flow with non-Uniform Viscosity and Wall Friction Without Inertia Effect, Technion – Israel Institute of Technology, Master Project.
33. Bird C., Breward C. J. W., Dellar P., Edwards C. M., Kaouri K., Richardson G., Wilson S. K., 2002, Mathematical modeling of pipe-flow and extrusion of composite materials. Study Group Report
34. Sadeghy K., Khabazi N., Taghavi S. M., 2007, Magnetohydrodynamic (MHD) Flows of Viscoelastic Fluids in Converging/Diverging Channels, **International Journal of Engineering Science**, 45(11): 923-938
35. Thess A., Votyakov E., Kolesnikov Y., 2006, Lorentz Force Velocimetry, **Phys. Rev. Lett.**, 96: 164501-1 – 4
36. Sarkar S., Ganguly S., 2015, Fully developed thermal transport in combined pressure and electroosmotically driven flow of nanofluid in a microchannel under the effect of a magnetic field, **Microfluidics and Nanofluidics**, **18(4)**: 623-636
37. Membrado M., Pacheco A. F., 2011, Equations in Curvilinear Coordinates for Fluids With non-Constant Viscosity, **Latin-American Journal of Physics Education**, 5(4): 702-708
38. Sherwood J. D., Durban D., 1996, Squeeze Flow of a Power law Viscoplastic Solid, **J. Non-Newtonian Fluid Mech.**, 62: 35–54.
39. Dib, A., Haiahem, A., Bou-said, B., 2014, An Analytical Solution of the MHD Jeffery–Hamel Flow by the Modified Adomian Decomposition Method, **Computers & Fluids**, 102: 111-115

Experimental Investigation of Module Temperature Effect on Photovoltaic Panels Efficiency

Engin GEDİK^{1,*}

¹Energy Systems Engineering Department Faculty of Technology, Karabük University, TR-78050, Karabük, Turkey

(Received : 21.03.2016 ; Accepted : 20.05.2016)

ABSTRACT

A Photovoltaic module efficiency is mainly depend on the ambient temperature, module temperature, incoming solar radiation intensity and photovoltaic material composition. In the present work, the effect of module temperature on the photovoltaic (PV) panel efficiency was investigated experimentally. Incoming solar radiation on the PV surface (I), ambient temperature of the panel (Ta), back surface temperature of the panel (Tp), voltage and current are the main parameters measured during the experiments. In the experimental system the area that PV module placed have been adjusted four different ambient air temperature as 10, 20, 30 and 40 °C. PV module efficiencies are calculated with using obtained experimental data. According to the computations the module efficiency was 12.07% for the 14.9 °C of Tp while it was found as 10.7% for the 51.3 °C of Tp. It was observed that increasing of PV module temperature decreases efficiency.

Keywords: Energy, Solar energy, photovoltaic module temperature, efficiency, zenith angle.

Modül Sıcaklığının Fotovoltaik Panellerin Verimine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

ÖZ

Bir fotovoltaik (PV) modülün verimi esas olarak ortam sıcaklığına, modül sıcaklığına, güneş ışınım şiddetine ve fotovoltaik malzemenin bileşimine bağlıdır. Sunulan bu çalışmada modül sıcaklığının PV panelin verimine olan etkisi deneysel olarak incelenmiştir. PV yüzey üzerine gelen güneş ışınım şiddeti (I), panelin bulunduğu ortam sıcaklığı (Ta), panel arkası sıcaklık (Tp) gerilim ve akım değerleri deney süresince ölçülen ana parametrelerdir. Deneylerde PV modülün bulunduğu ortam 10, 20, 30 ve 40 °C olmak üzere dört farklı sıcaklık değerine ayarlanmıştır. Deneysel çalışmadan elde edilen veriler kullanılarak PV modülün verimi hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre 14.9 °C panel arkası sıcaklığı (Tp) için % 12.07 olan modül verimi Tp=51.3 °C için %10.7 olmuştur. PV modül sıcaklığının artışı verimi düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Enerji, Güneş enerjisi, Fotovoltaik modül sıcaklığı, verim, zenit açısı

1. INTRODUCTION

Energy is an indispensable part of today's society. Countries are faced to increasing energy requirements with depleted energy sources. Besides, environmental problems resulted use of fossil-based energy sources, has led to the search for new energy sources. In this way solar energy is quite important assigned in renewable energies with its endless light and heat sources. Today, solar cells utilizing solar energy to electrical energy are produced and the efficiency of the systems developed in this direction is being investigated. Photovoltaic systems are commonly used all around world as shown themselves to be one of the most promising applications for dealing with electricity generation [1-4]. Generally, a typical PV module converts only 4-20% of the incoming solar radiation into electricity depending upon the type solar cells and climatic conditions [5, 6]. Therefore a big part of the incoming solar energy is extracted as heat and the temperature of PV module which is a parameter that has great influence in the behavior of a PV system is increase

[7]. Hanlin and Stein [8] have modeled the module temperature of PV system using a transient heat-flow model. Single day of measured module temperature has used simultaneous non-linear least squares regression and optimized then tested for accuracy using a year's worth of data for one location. Environmental conditions on module temperature of selected PV system in Singapore have analyzed by the Ye et al. [9].

Cooling of PV panels is providing a significant efficiency increases [10-12]. As it was reported in Bahaidarah et. al. [13] the efficiency of the PV module is mostly depend on operation temperature. It was mentioned in their paper active cooling method applications has increased the PV module efficiency about 9%. Their claims will be verification when the Ceylan et al [14] study was read. They have investigated different PV/T systems to cool photovoltaic modules. In experimental study simple spiral pipe recirculated water inside was placed to the back surface of PV module to provide cooling effect as a heat exchanger. The cooled module efficiency was reported as 13% whereas uncooled was 10% at the end of the study. In another work which was investigated experimentally by Teo et al. [15] an active cooling

*Corresponding Author

e-mail: egedik@karabuk.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 569-576

method was developed for PV modules. Temperature profile obtained experimental tests had been compared with simulation model and it was said to be an excellent agreement between simulation model and experimental results in the paper. Agrawal et al [16] has investigated performance of PVT solar air collector. Electrical and thermal efficiency of the PVT systems was reported as %12.4 and %35.7 respectively at the end of the study. Another study was performed which is resulted in 8.4 % and 42% electrical and thermal performances by Solanki et al. [17].

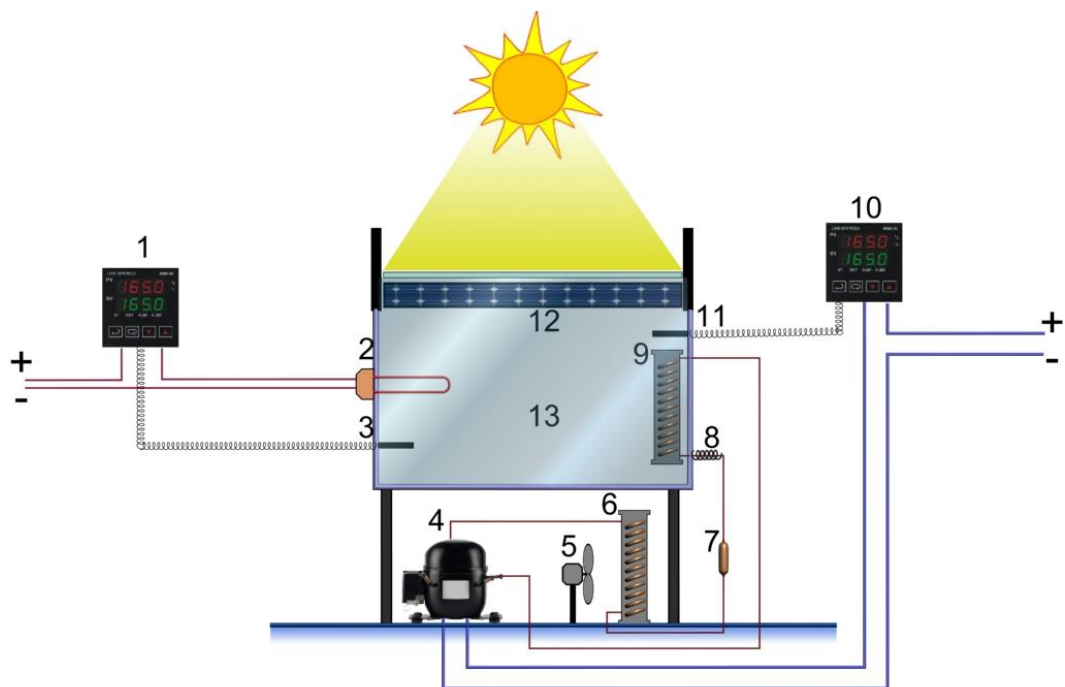
Motivated by the above studies the main objective of the present study is to determine module temperature effect of the PV- module performance. For this purpose an experimental test rig was designed and produced. In the experimental test rig the ambient temperature of the PV module placed area was set to different temperatures. The ambient temperature values have tried to be a constant temperature with heating and cooling operations by using process control equipment's. For heating process electrical resistances were used while vapor compression refrigeration cycle system was used for cooling process. Solar radiation intensity, ambient temperature of PV module, back surface temperature of the PV module, voltage and current are the main measured parameters in the experimental tests. Obtained results by using experimental measured data were used to calculate the

followed by a discussion of the results of the experimental studies in Section 3 ending with a conclusion in Section 4.

2. MATERIAL AND METHOD

Photovoltaic solar panel is positioned into a closed chamber in order to observe the changes in the temperature of the PV module. Closed chamber was surrounded with glass material. Indoor temperatures are fixed by four different temperature values. To obtain constant temperatures values in indoor, cooler and heater equipment's were used. For heating and cooling process electrical heater and simple vapor-compression refrigeration cycle system was used. It has been possible to hold desired constant temperatures with using PID control equipment. A schematic diagram of the experimental apparatus used in this work is shown in Figure 1 and the photograph is shown in Figure 2.

Incoming solar radiation intensity on the PV module numbered as 12 in the Figure.1 was measured with solarmeter. Indoor environment temperature numbered as 13 was adjusted at desired temperature values with using number 2 and cooling equipment numbered as 4-5-6-7-8-9 in the figure. When temperature of the indoor environment decreases under the set value number 1 (automatic control equipment) activates the number 2 to get the desired temperature. Similar case has occurred for



1. Process control equipment (for heater), 2. Electrical heater, 3. Temperature sensor, 4. Compressor, 5. Fan, 6. Condenser, 7. Dryer, 8. Capillary tube, 9. Evaporator, 10. Process control equipment (for cooling) 11. Temperature sensor, 12. Photovoltaic module.

Figure 1. Schematic view of the experimental test rig [4, 18].

efficiency of the PV module and presented with graphical and tabular form. The paper is organized as follows: The experimental procedure is described in the next section

reverse namely, when temperature of the indoor environment rises above the set value, number 10 activates the cooling system to get the desired

temperature. This process is work automatically in the experimental setup. Digital thermostats were used to activate the heating and cooling systems. In the experiments solar radiation, ambient air temperature of the PV module, back surface temperature of the PV module was measured and recorded to a personnel computer.



Figure 2. Photograph of the experimental system.

Solar radiation incoming the PV module converts to electrical energy and stored in accumulator. Stored electrical energy works the LEDs light placed in the experimental systems. Specification of the experimental component are given in Table 1.

Table 1. Specification of the experimental components.

Experimental components	Features
Condenser	1/4 hp
Evaporator	1/5 hp
Compressor	12/24 V 70 W
Accumulator	SP 127 (12V 7AH/20 HR)
Sheet Centrifugal Fans	18/120, 275 m ³ /h flow rate 220 V 85 W
Kyocera crystalline silicon solar module	10 W
Multimeter	JT-830LN
Haenni digital solar meter	Model-130 1500W/m ² , sensitivity ±1.5%
Lae Dijital termostat and TT-T-ECHNI-C Thermometer,	sensitivity ±0.05%

Using the obtained data by experimental measurements the PV module efficiency has been calculated. According to [4, 19, and 22] PV module cell efficiency can be defined as;

$$\eta_c = \eta_0 [1 - \beta(T_p - 25)] \quad (1)$$

where; η_0 is standard test conditions efficiency (I=1000 W/m² and T_c=25 °C) which has value 0,13 as can be seen in Figure 3. T_p and β are the panel temperature and electrical efficiency thermal coefficient respectively. β value depends on the features of the materials from which

the PV module is produced. For crystal silicon almost 0.0045/K is taken [19, 20]. The electrical efficiency of the PV module is given as follows:

$$\eta_m = \eta_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_c \cdot \delta_c \quad (2)$$

where; τ_g , α_c and δ_c are the transparency for the PV module glass, absorptivity of the solar cell and packing factor. The values for these are taken as 0.90, 0.95 and 0.90, respectively [19, 21].

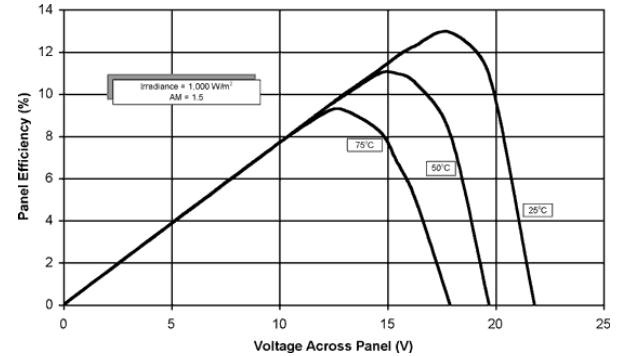


Figure 3. Standard test conditions efficiency of the PV module.

In addition that, a simple program that helps to locate PV modules in any place and time which is based on incoming solar angle was developed on the purpose of performing experimental test conditions. PV panels can be tested at 1000 W/m² solar radiation and 1 or 1.5 air mass values. Air mass (AM) definition is as follow,

$$AM = \frac{1}{\cos\phi} \quad (3)$$

where $\cos\phi$ is the solar zenith angle.

The main objective of this developed program is to calculate the solar zenith angles (ϕ) of predicted days. Solar zenith angle can be defined as follow:

$$\cos\phi = (\sin L \times \sin\delta) + (\cos L \times \cos\delta \times \cosh) \quad (4)$$

where;

L, δ and h are the Latitude degree, declination angle and hour angle respectively. Declination angle described as follow:

$$\delta = 23.45 \sin \left[360 \frac{284+i}{365} \right] \quad (5)$$

where i is defined number of days since the start of the year. The predicted experiment hour is defined as h and calculated with the following equation.

$h = (AST - 12) \times 15$ (6)
 where; AST is areal (local) solar time. A screenshot of the created program is shown in Figure 4.

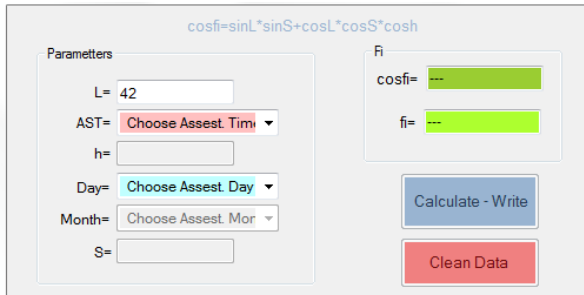


Figure 4. A screenshot of the developed program.

The angle of PV module can be adjusted for a specific region and time zone with the help of this program in order to obtain highest efficiency from PV module. For instance, the zenith angle can be calculated by developed program for experiments on 14th, 15th and 16th days of July between 14:00 and 18:00 in the prevailing weather conditions of Karabük (L=42°) city of Turkey. The calculated zenith angels for these assumptions are shown in Table 2.

Table.2 Computed solar zenith angles.

<i>i</i>	δ	<i>AST</i>	<i>h</i>	<i>L</i>	<i>cosφ</i>	ϕ	<i>AM</i>
195	21.6746	14	30	42	0.8452	32.305	1.1831
195	21.6746	15	45	42	0.7354	42.653	1.3597
195	21.6746	16	60	42	0.5924	53.670	1.6879
195	21.6746	17	75	42	0.4258	64.793	2.3480
195	21.6746	18	90	42	0.2471	75.692	4.0464
195	21.6746	19	105	42	0.0683	86.078	14.6202
196	21.5173	14	30	42	0.8441	32.418	1.1846
196	21.5173	15	45	42	0.7342	42.753	1.3619
196	21.5173	16	60	42	0.5911	53.764	1.6917
196	21.5173	17	75	42	0.4243	64.889	2.3564
196	21.5173	18	90	42	0.2454	75.793	4.0746
196	21.5173	19	105	42	0.0664	86.187	15.0375
197	21.3536	14	30	42	0.8430	32.536	1.1862
197	21.3536	15	45	42	0.7330	42.856	1.3641
197	21.3536	16	60	42	0.5897	53.863	1.6957
197	21.3536	17	75	42	0.4227	64.989	2.3652
197	21.3536	18	90	42	0.2436	75.898	4.1043
197	21.3536	19	105	42	0.0645	86.301	15.5003

In the present work, the measurement uncertainties of temperature are ±0.05, which contains a measurement error of ±0.5 °C by thermocouples. The uncertainty in the solar radiation measurement is 1.5%. The uncertainties of efficiency which are calculated by directly measured values such as temperature, incoming solar radiation are generally denoted as ∂_x described as follow.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

where R is a given function of the independent variables $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, w_R the uncertainty in the results. Through calculations, the uncertainty values of efficiency are less than 6%.

3. RESULTS AND DISCUSSION

A series rigorous tests were conducted on the designed and manufactured experimental setup to observe module temperature effect to the PV panel efficiency. Experiments were performed outdoor conditions regardless of the change of zenith angle. In the experiments incoming solar radiation intensity ($I, W/m^2$), ambient temperature of PV panel (T_a), back surface temperature of module (T_p), current and voltage values were measured and recorded in a personnel computer. Following graphs were plotted as a result of obtained measurements. The ambient air temperature of the PV panel has adjusted four different temperature as 10, 20, 30 and 40 °C. These values has tried to be kept constant during the experimental time.

The back surface temperatures of the PV module at 10 °C ambient temperature that are varied incoming solar radiation intensity are shown in Figure 5. It can be clearly seen from Figure 5, instantaneous variations of solar radiation intensity were occurred. These variations has been taking place because of the fact that the weather conditions are cloudy/partially cloudy.

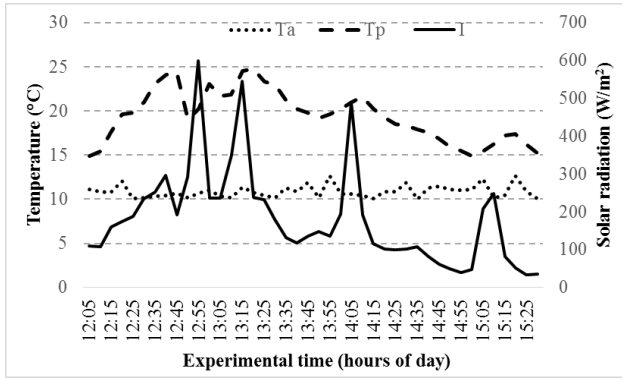


Figure 5. Variations of T_p depends upon solar radiation intensity, $T_a=10\text{ }^\circ\text{C}$.

In addition, these variations influenced on the back surface temperatures of the PV module directly. Solar radiation intensity and back surface temperature values decreased and increased proportionally. The back surface temperatures are varied between 14.9 and 24.8 °C during test period.

The back surface temperatures of the PV module at 20 °C ambient temperature that are varied incoming solar radiation intensity are shown in Figure 6. It can be clearly seen from Figure 6, instantaneous variations of solar radiation intensity were occurred at the beginning of test. Although the small variations were observed on the solar radiation intensity after the 50th minutes of the test and it tends to decrease. These variations influenced on the back surface temperatures of the PV module directly. Solar radiation intensity and back surface temperature values decreased and increased proportionally. The back surface temperatures are varied between 22.3 and 32.8 °C during test period.

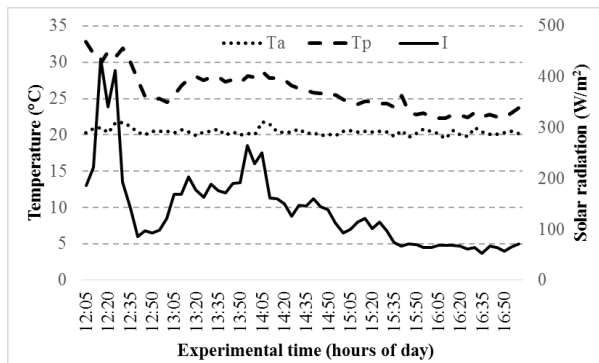


Figure 6. Variations of T_p module depends upon solar radiation intensity, $T_a=20\text{ }^\circ\text{C}$.

The back surface temperatures of the PV module at 30 and 40 °C ambient temperatures that are varied incoming solar radiation intensity are shown in Figs 7 and 8 respectively. When Figure 7 was examined it is seen that back surface temperatures are varied between 31.9 and 47.5 °C during test period. In a similar manner back surface temperatures are varied between 40.7 and 51.3 °C for $T_a=40\text{ }^\circ\text{C}$ as shown in Figure 8.

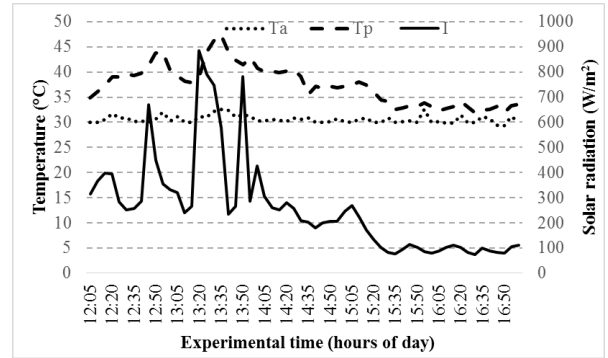


Figure 7. Variations of T_p depends upon solar radiation intensity, $T_a=30\text{ }^\circ\text{C}$.

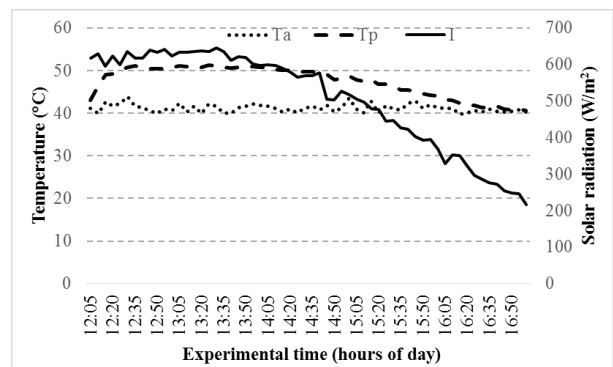


Figure 8. Variations of T_p depends upon solar radiation intensity, $T_a=40\text{ }^\circ\text{C}$.

Measured current and voltage values for each set temperatures are averaged and tabulated in Table 3. The measured voltage values were varied between 12.01 and 12.82 V, whereas current values were changed between 0.08 and 0.1 A.

Table 3. Current and voltage values.

T_a (°C)	T_p^* (°C)	Current (A)*	Voltage (V)*
10	19.4	0.08	12.820
20	25.8	0.09	12.521
30	37.4	0.1015	12.179
40	47.4	0.1038	12.011

*Average values of measurements.

Efficiency values changing with T_p has shown in Figure 9 for different T_a . It is clear to say from the figure increasing of T_p has caused to decrease efficiency for all T_a values.

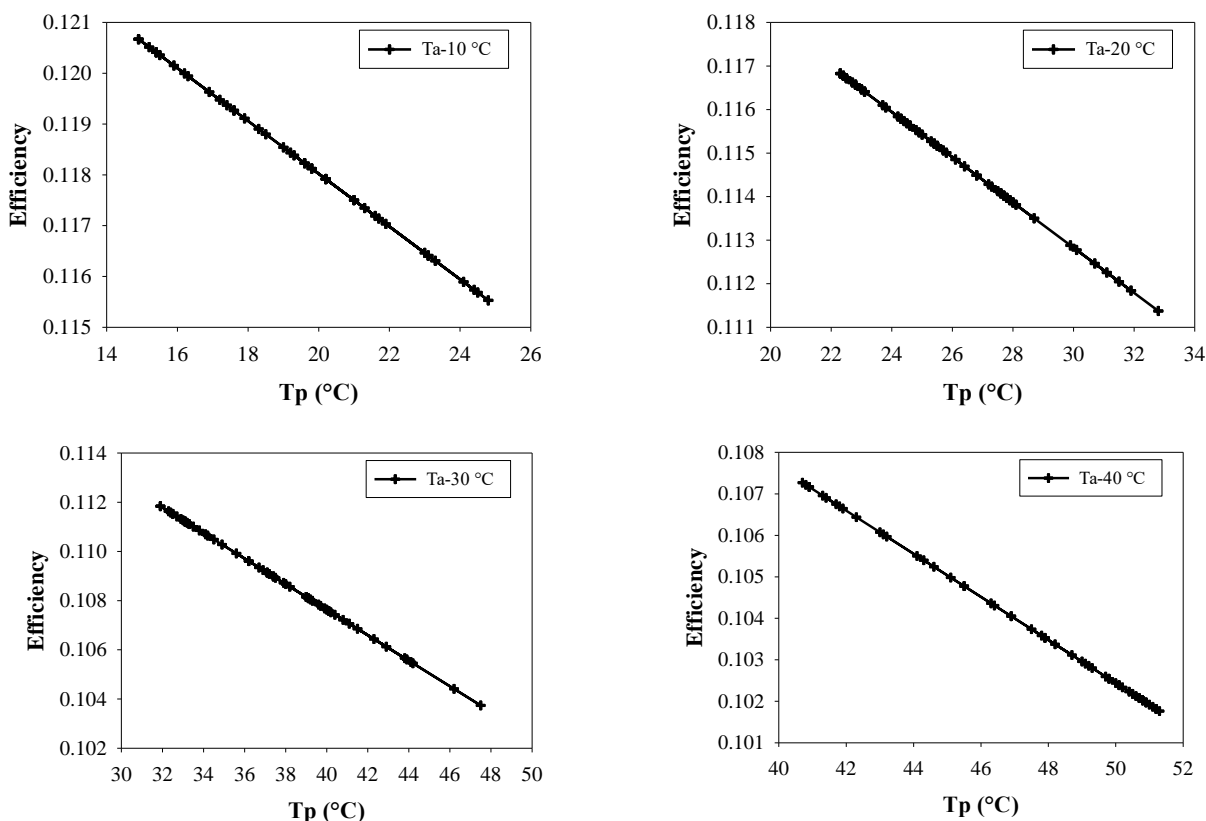


Figure 9. Variations of efficiency with T_p .

The ambient temperature of the PV module at 10 °C, the efficiency of PV module was varied between 12.07% and 11.57% for $T_p = 14.7$ and 24.8 °C respectively. The lowest efficiency value has been calculated as 10.17% in the situation where ambient temperature is 40 °C for the

$T_p = 51.3$ °C. As it was reported in the previous studies [6, 22] increasing PV module temperatures decreases electrical efficiency and computed efficiency values in this work was found in good agreement with previous published results as given Table 4.

Table 4. Comparison of the efficiency values with previous published results.

Study	Type of cell	Electrical Efficiency (%)
Present	Crystalline silicon	10.27-11.94
Ceylan et al. [14]	Crystalline silicon	10.15
Moradi et. al. [23]	Crystalline silicon	10.00–15.00
Evans D.L. [24]	Mono Crystalline silicon	15.00
Truncellito and Sattolo [25]	Mono Crystalline silicon	11.00
Chow [26]	Mono Crystalline silicon	12.0

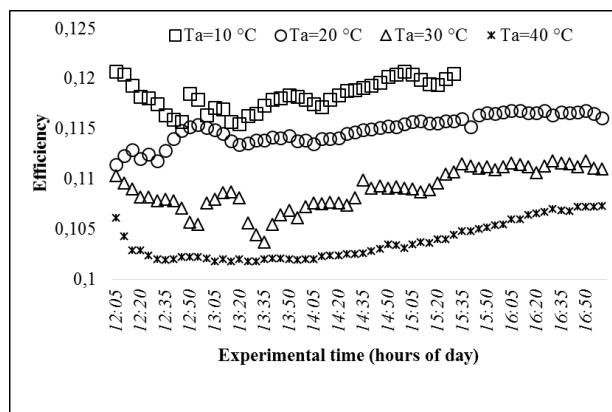


Figure 10. The PV module efficiencies during the experimental time for different T_a values.

Variations of efficiency values versus experimental time has been shown in Figure 10. It is clear to see decreasing efficiency values with increasing ambient temperatures. While the average module efficiency was computed as %11.94 for $T_a=10$ °C, it was computed as %11.30, %10.81 and %10.27 for $T_a=20, 30$ and 40 °C respectively. Changing module efficiency during the experimental time is resulted from variations of incoming solar radiation intensity on the PV module surface.

4. CONCLUSION

An experimental approach of a PV system is studied regarding its temperature and efficiency. The system is tested under the climatic conditions of Karabük, Turkey. The measured and calculated values obtained from the results of this work are discussed as follows:

- ✓ The ambient air temperature is a very important factor in terms of photovoltaic module temperature.
- ✓ As the solar radiation increased, temperature of PV module has also increased which is directly effect to photovoltaic *module* electrical efficiency to decrease according to Figure 9.
- ✓ The solar zenith angles can be obtained for any desired time and places with the recommended program.
- ✓ An effective way to increase efficiency of a PV module is to reduce the operating temperature of PV module. This may be performed by using active and passive cooling techniques of the PV module during the process.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Karabük University Scientific Research Projects Unit, Karabük/TURKEY for providing the financial supports for this study under the KBÜ-BAP-13/2-YL-037 project.

REFERENCES

1. Almonacid F., Rus C., Perez P.J., Hontoria L., "Estimation of the energy of a PV generator using artificial neural network", *Renewable Energy* 34: 2743-2750, (2009)
2. Dincer F., "Over view of the photovoltaic technology status and perspective in Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15: 3768-3779, (2011).
3. Weiss G.B., Wray C., Delp W., Ly P., Akbari H., Levinson R., "Electricity production and cooling energy savings from installation of a building-integrated photovoltaic roof on an office building", *Energy and Buildings* 56: 210-220, (2013).
4. Ceylan İ., Gedik E., ErKaymaz O., Gürel A.E., "The artificial neural network model to estimate the photovoltaic modul efficiency for all regions of the Turkey", *Energy and Buildings* 84: 258-267, (2014).
5. Chandrasekar M., Suresh S., Senthilkumar T., Karthikeyan M. G., "Passive cooling of standalone flat PV module with cotton wick structures", *Energy Conversion and Management* 71: 43-50 (2013).
6. Dubey S., Sarvaiya J.N., Seshadri B., "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world a review", *Energy Procedia* 33: 311-321, (2013)
7. Garcia M.C.A., Balenzategui J.L., "Estimation of photovoltaic module yearly temperature and performance based on nominal operation cell temperature calculations", *Renewable Energy* 29: 1997-2010, (2004).
8. Hanlin A.L., Stein J.S., "Improvement and validation of a transient model to predict photovoltaic module temperature, in: SAND 2012-4307", Sandia National Laboratories, New Mexico, USA, 2012.
9. Ye Z., Nobre A., Reindl T., Luther J., Reise C., "On PV module temperatures in tropical regions", *Solar Energy* 88: 80-87, (2013).
10. Moharrama K.A., Abd-Elhady M.S., Kandila H.A., El-Sherifa H., "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling", *Ain Shams Engineering Journal* 4: 869-877, (2013).
11. Teo H.G., Lee P.S., Hawlader M.N.A., "An active cooling system for photovoltaic modules", *Applied Energy* 90: 309-315, (2012).
12. Mehrotral S., Rawat P., Debbarma M., Sudhakar K., "Performance of a solar panel with water immersion cooling technique", *International Journal of Science, Environment and Technology*, 3: 1161-1172, (2014).
13. Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S., "Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions", *Energy* 59: 445-453, (2013).
14. Ceylan İ., Gürel A.E., Demircan H., Aksu, B. "Cooling of a photovoltaic module with temperature controlled solar collector", *Energy and Buildings* 72: 96-101, (2014).
15. Teo H.G., Lee P.S., Hawlader M.N.A., "An active cooling system for photovoltaic modules", *Applied Energy* 90: 309-315, (2012).
16. Agrawal S., Tiwari G.N., Pandey H.D., "Indoor experimental analysis of glazed hybrid photovoltaic thermal tiles air collector connected in series", *Energy and Buildings* 53: 145-151, (2012).
17. S.C. Solanki, S.Dubey, A.Tiwari, Indoor simulation and testing of photovoltaic thermal (PV/T) air collectors, *Applied Energy* 86: 2421-2428, (2009).
18. Öztürk E., "Experimental investigation of module temperature effect on photovoltaic panel's efficiency", MsC Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, University of Karabük, 2014.
19. Mishra RK., Tiwari GN., "Energy and exergy analysis of hybrid photovoltaic thermal water collector for constant collection temperature mode", *Solar Energy* 90: 58-67, (2013).
20. Ceylan İ., ErKaymaz O., Gedik E., Gürel A.E., "The prediction of photovoltaic module temperature with

- artificial neural networks”, *Case Studies in Thermal Engineering* 3: 11-20, (2014).
21. Dubey S, Solanki SC, Tiwari A., “Energy and exergy analysis of PV/T air collectors connected in series” *Energy Build*, 41: 863-870, (2009).
 22. Skoplaki E., Palyvos J.A., “On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations”, *Solar Energy* 83: 614-624, (2009).
 23. Moradi K, Ebadian MA, Lin C.X., “A review of PV/T technologies: Effects of control parameters” *International Journal of Heat and Mass Transfer* 64: 483-500, (2013).
 24. Evans D.L., “Simplified method for predicting PV array output”, *Solar Energy* 27: 555-560, (1981).
 25. Truncellito NT, Sattolo AJ. General Electric Advanced Energy Department; 1979.
 26. Chow T.T., “Performance analysis of photovoltaic–thermal collector by explicit dynamic model”, *Solar Energy* 75 (2): 143-152, (2003).

Farklı Rüzgar Türbin Kanat Profillerinin Aerodinamik Performansının Deneysel İncelenmesi

İlker YILMAZ, Ömer ÇAM, Murat TAŞTAN, Adem KARCI

Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde Motor Bölümü,
38039, Melikgazi, KAYSERİ

(Geliş / Received : 07.04.2016 ; Kabul / Accepted : 04.06.2016)

ÖZ

Yapılan çalışmada Kayseri ili hava şartlarında verimli çalışabilecek farklı rüzgar türbin kanat profillerinin aerodinamik performansları subsonik rüzgar tüneline deneysel olarak incelenmiştir. Literatürde yaygın kullanılan 3 farklı kanat profili (S826, NACA 4415, NACA 63-415) belirlenmiştir. Üretilen profillerin aerodinamik parametreleri (C_L , C_D , C_L/C_D) Gamma tipi yük hücresi (loadcell) vasıtasıyla ölçülmüştür. Deneyler 3 farklı hızda (6-7-8 m/s, 126000-147000-168000 Reynold sayılarında) ve -4° ile 26° hücum açılarında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermektedir ki NACA 63-415 kanat profilinin 4° ile 12° hücum açılarında C_L/C_D değeri yaklaşık olarak 7 iken diğer kanat profillerinin aynı hücum açılarında 4 civarındadır. 12° hücum açısından sonra NACA 63-415 kanat profilinin C_L/C_D değeri düşüş gösterse de 21° hücum açısına kadar üstünlüğü devam etmektedir. Bu çalışma ile geniş aralıklı hücum açılarında Kayseri’de kurulabilecek düşük hızda çalışan Rüzgar Enerji Santralleri için NACA 63-415 kanat profili kullanımı verim açısından daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kanat Profili, Aerodinamik, Performans parametreleri

Experimental Investigation of Aerodynamic Performance of Different Wind Turbine Airfoils

ABSTRACT

In this study aerodynamic performance of the different wind turbine airfoils that can work efficiently in the province of Kayseri weather conditions was investigated in subsonic wind tunnel. Firstly, the theoretical study had been done and 3 airfoils (S826, NACA 4415, NACA 63-415) were determined. Aerodynamic parameters (C_L , C_D , C_L/C_D) of the airfoils manufactured in the model airplane workshop was measured by a Gamma type force/torque sensor (loadcell). Experiments was carried out between -4° and 26° angle of attack at 3 different velocities (6-7-8 m/s, 126000-147000-168000 the Reynolds number). According to the obtained results NACA 63-415 airfoil showed that C_L/C_D values are about 7 between 4° and 12° angle of attack when others are 4. After the angle of attack of 12° C_L/C_D values of NACA 63-415 airfoil decreased and until the angle of attack of 21° this airfoil has higher lift / drag ratios then other airfoils.

As a result, wind power plants operating at low speed can be established in Kayseri with NACA.63-415 airfoil that has concluded that it is better to use in terms of efficiency.

Key Words: Airfoil, Aerodynamics, Performance parameters

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyadaki nüfus artışı ve ilerleyen teknoloji ile birlikte enerji tüketimi hızla artmaktadır. Günümüzde tüketilen enerjinin en büyük tedarik kaynakları fosil yakıtlardır. Bu yakıtların egzoz gazlarının çevreye verdiği zararların sürekli artması, insan ve diğer canlılar için tehlikeli seviyelere ulaşması nedeniyle araştırmacılar ve bilim insanları alternatif enerji kaynakları üzerine çalışmalar yapmaktadırlar. Yenilenebilir enerji kaynaklarından bir tanesi de insanoğlu tarafından binlerce yıldır bir enerji kaynağı olarak kullanılan rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi, tükenmez bir kaynak olması özellikle kırsal alanlar için sosyo-ekonomik gelişmelere yardımcı olması nedeniyle uygun ve önemli bir enerji kaynağı olarak görülmektedir.

Rüzgar türbini kanat profillerinin aerodinamik performans incelemelerinde genel amaç, kurulması düşünülen Rüzgar Enerji Santralinin (RES) en verimli şekilde çalışmasını sağlayacak parametrelerin belirlenmesidir. Bu amaçla yapılan birçok araştırma literatürde mevcuttur. Chen ve arkadaşları, çalışmalarında maksimize edilmiş C_L/C_D oranları sahip yeni bir kanat profili grubu tasarlamışlardır. Rüzgar Tüneline yaptıkları deneysel çalışmalarda zorlu hava şartlarını da dahil etmişlerdir. Ayrıca deneysel veriler ile RFOIL tahminlerini kıyaslayarak uyumluluğunu belirlemişlerdir[1]. Şahin ve Acır, deneysel ve sayısal olarak NACA 0015 rüzgar türbin kanat profilinin taşıma ve sürüklenme performansını incelemişler, kanat profili için optimum taşımanın ve optimum performansın olduğu hücum açılarını belirlemişlerdir[2]. Yao ve arkadaşları, NACA 0018 rüzgar türbin kanat profilinin aerodinamik performansını iki boyutlu olarak hesaplamalı akışkanlar mekaniği ile

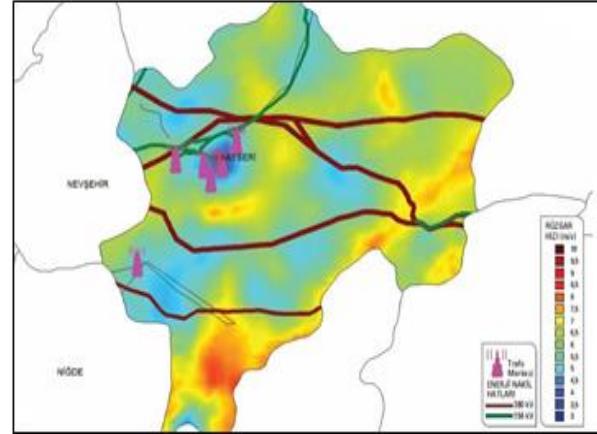
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: iyilmez@erciyes.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 577-584

incelemiştir. Taşıma ve sürüklenme katsayıları farklı türbülans modeller ve deneysel sonuçlar ile incelenmiş ve kıyaslanmıştır. Yaptığı çalışmada farklı türbülans modellerinin uygulanabilirliği incelenmiştir. Sonuçlar rüzgar türbin kanat profilleri için örnek kabul edilebilir [3]. Cohan ve Aratoopour, rüzgar türbini kanat profillerinde yağmur ve yüzey özelliklerinin performans üzerine etkilerini nümerik olarak incelemiştir. Çok fazlı akışkanlar dinamiği hesaplamaları ile yağmur damlaları oluşturulmuş. Farklı sıklıklarda yağmur yağışlarının rüzgar türbin kanat profilleri yüzey özelliklerini üzerine etkileri incelenmiştir. Kanat profiline yüzeyini kaplayacak kadar çok miktarda olan yağışların performansta az etki yaptığını, düşük sıklıklarda ki yağışların ise performansı değiştirdiği tespit edilmiştir[4]. Coscker, yaptığı çalışmada küçük bir rüzgar türbininin tasarım ve optimizasyonunu yapmıştır. Bu amaçla kanat profili ve diğer parametrelerin belirlenmesi için gerekli tasarım aşamalarını ayrıntılı olarak incelemiştir. Yaptığı araştırmalar sonucu rüzgar türbin tasarım ve optimizasyonunda en önemli parametrenin kanat profili seçimi olduğunu belirlemiştir[5]. Maulana ve arkadaşları, hesaplamaları akışkanlar dinamiği ile üç boyutlu olarak kanat profili tasarımının rüzgar türbin performansı üzerine etkisini araştırmışlardır. Çalışmada 63 serisi kanat profilleri kullanılmış ve sonuç olarak NACA 63-412 kanat profiline belirgin iyileştirme sağlanmıştır[6]. Güleren ve Demir, farklı geometriye sahip altı kanat profili için yüksek Reynolds sayısında ve düşük hücum açıları için sayısal çalışmalar yapmıştır. CLARK-Y kanat profiline en iyi performansa sahip olduğu ve daimi analizlerin geçerliliğinin kanat profillerine göre farklı hücum açıları ile sınırlı olduğu görülmüştür[7].

Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA), orta ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro ölçekli rüzgar akış modeli kullanılarak üretilen rüzgar kaynak bilgileridir. Bu atlas yardımıyla Türkiye genelinde yüksek çözünürlükte; farklı yüksekliklerdeki yıllık ve mevsimlik rüzgar hız ortalamaları ile güç yoğunlukları, yıllık kapasite faktörü vb. birçok bilgi edinilebilmektedir. Şekil 1'de ise bu atlaslardan Kayseri ili için rüzgar hız ortalamaları ve enerji nakit hatları gösterilmektedir[8]. Ekonomik Rüzgar Elektrik Santrali (RES) yatırımı için 7 m/s veya üzerinde rüzgar hızı gerekmektedir. Kayseri ilimizde ise Şekil - 1'de rüzgar hız dağılımından da görüleceği gibi RES yatırımı için uygun alanlar bulunmaktadır. Bu yatırımlara örnek olarak geçici kabulü yapılarak işletmeye alınan lisanslı rüzgar santrali (72,00 MW kurulu güç) Yahyalı ilçesinde Aksu Temiz Enerji Elektrik Üretim Sanayi ve Ticaret A.Ş. gösterilebilir[9]. Ayrıca verilen enerji nakil hatlarının RES kurulabilecek alanlara olan yakınlığın Kayseri'de bu santrallerin sayısının daha fazla olması gerektiğini göstermektedir. Çizelge 1'de Kayseri iline kurulabilecek rüzgar enerjisi santrali güç kapasitesi verilmiştir. 6,8 ile 8,1m/s rüzgar hızına sahip alanlardan elde edilebilecek gücün toplam elde edilebilecek güç kapasitesinin %98'ine denk geldiği görülmektedir. Bu değerler deneysel çalışmanın yapılacağı hız değerleri olacaktır.



Şekil 1. Enerji nakil hatları [8] (Energy transmission lines)

Çizelge 1. Kayseri iline kurulabilecek rüzgar enerjisi santrali güç kapasitesi [8] (Wind energy power plants capacity of Kayseri)

50 m'de Rüzgar Gücü (W/m ²)	50 m'de Rüzgar Hızı	Toplam Alan (km ²)	Toplam Kurulu Güç (MW)
300 – 400	6.8 – 7.5	276,69	1.383,44
400 – 500	7.5 – 8.1	95,20	476,00
500 – 600	8.1 – 8.6	4,85	24,24
600 – 800	8.6 - 9.5	0,32	1,60
> 800	> 9.5	0,00	0,00
		377,06	1.885,28

Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesinde (HUBF) yapılan bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Bu çalışmanın hayata geçirilebilmesi için HUBF' ta bulunan Model Uçak Atölyesi (MUA) ve Subsonik Rüzgar Tüneli Laboratuvarı (SRTL)'ndan faydalanılmıştır. İlk olarak Kayseri ili ve çevresi rüzgar hız dağılımlarına ve elde edilebilecek güç kapasitesine uygun bölüm 2.5 te bir kısmı verilmiş olan literatürde yaygın kullanılan kanat profilleri belirlenmiştir. Belirlenen kanat profillerinin sayısı 3'e düşürülmüştür. Daha sonra ise MUA'nde üretilmiş belirlenen rüzgar türbin kanat profillerinin SRTL'nda aerodinamik performansı deneysel olarak incelenmiştir. Yapılacak çalışmada Sıcak Tel Anemometresi (Hot-wire Anemometer), 3 eksenli kuvvet ve moment ölçer (Yük Hücre) ve pitot tüpü kullanılmıştır. Böylece rüzgar türbin kanat profillerinin performans parametreleri için istenilen veriler elde edilmiştir. Yapılan çalışmada rüzgar tüneli hızı ve kanat profillerinin hücum açısının değiştirilmesi ile yeter sayıda deneyler yapılmıştır. Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak belirlenen bir şehrin Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası incelenerek (RES) için en uygun hız aralıkları belirlenmiş. Böylece RES için elde edilebilecek güç kapasitesi maksimize edilmiştir. Üç farklı kanat profiline rüzgar tünelinde deneyleri yapılarak rüzgar türbin kanat profilleri için ana

parametrelerden biri olan C_L/C_D oranları farklı hücum açılarında incelenmiştir.

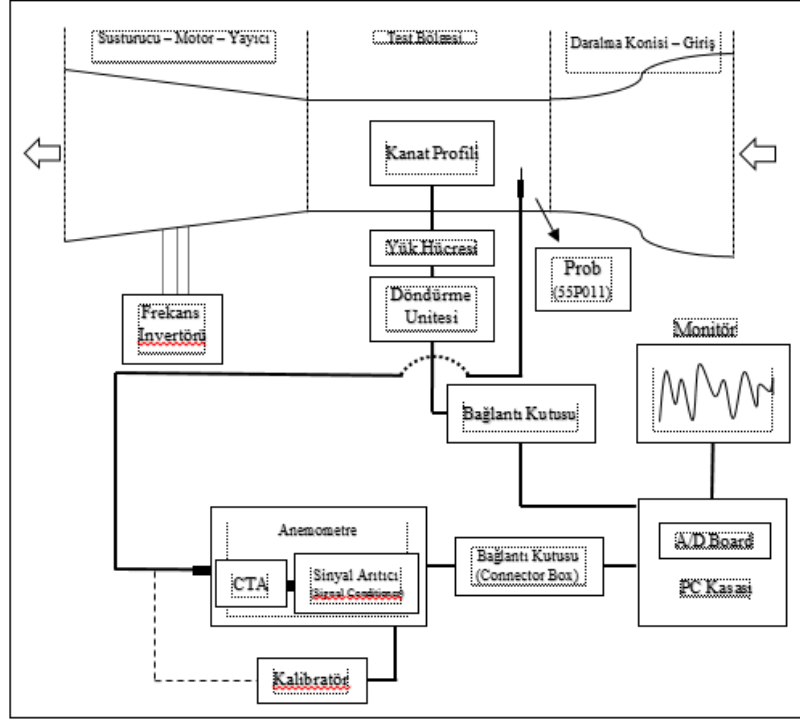
2. GEREÇ VE YÖNTEM (MATERIALS AND METHODS)

Yapılan çalışma için oluşturulan deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil' 2 de verilmiştir.

türbülans şiddeti uluslararası standartlarda ($< \%1$) ve test bölgesi giriş kesiti 57×57 cm ölçülerindedir.

2.2. Sıcak Tel Anemometresi ve Dantec Otomatik Kalibratör ve Traverse Mekanizması (Hot-wire Anemometer and Dantec Auto Calibrator and Traverse Mechanism)

Dantec Dynamics Pro StreamLine Sıcak Tel Anemo-



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Schematic representation of the experimental setup)

2.1. Rüzgar Tüneli (Wind Tunnel)

Rüzgâr tüneli açık devreli emmeli tip bir rüzgar tünelidir ve ana olarak 8 parçadan oluşmaktadır. Bunlar; Giriş Kanalı, Akış Düzenleyici Elek Flaşları, Daralma Konisi, Test Bölgesi, Kare – Daire Geçiş Kanalı, Yayıcı,

metre sistemi yüksek hassasiyetli Hotwire sistemidir. Sistem otomatik kalibrasyon ünitesine sahiptir. Hotwire sistemimiz deneysel akış ölçümlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca Hotwire sistemi gaz akışlarda yüksek frekanslı 1, 2 ve 3 boyutlu noktasal hız ve sıcaklık ölçümü yapabilme özelliğine sahiptir. Özellikle,



Şekil 3. Rüzgar tüneline ait fotoğraflar (Photos belonging to wind tunnel)

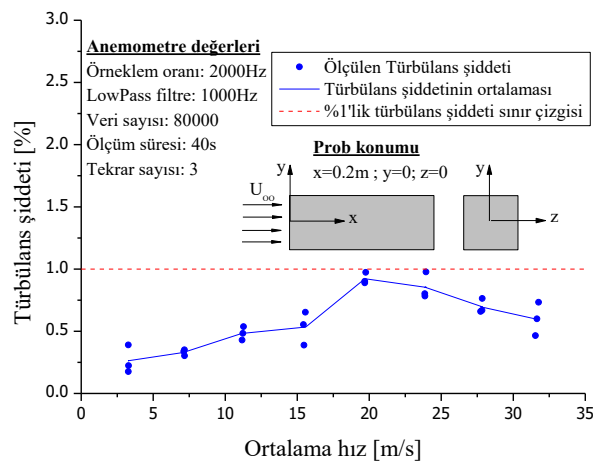
Motor ve Susturucu kısımlarıdır. Sistemin çalışma hız aralıkları 3 ila 33 m/s (fan devir sayısı 150 – 1200 d/dk),

tek noktadaki çok hızlı akış hızı değişimleri için (yüksek türbülans) için ideal bir çözümdür. Sistemde hız, sabit tel

sıcaklığı prensibiyle ölçülür. Tel bir devre ile ısıtılır. Telin üzerinden geçen akış telde ısı kaybına yol açar ve telin sıcaklığını dengeleyen Wheatstone köprüsündeki güç tüketiminin ölçüsü, telin üzerinden geçen akışın hızını verir. Rüzgar tünelimizin türbülans şiddetinin serbest akış hızı ile değişim analizleri Hotwire anemometremizde yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Sıcak Tel Anemometresi (Hot-wire Anemometer)



Şekil 5. Rüzgar tünelinin türbülans şiddetinin serbest akış hızı ile değişim grafiği (Graph of turbulence intensity with free flow speed)

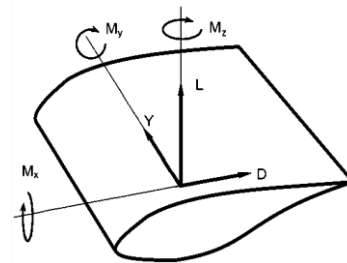
2.3. Bileşenli Kuvvet ve Moment Ölçüm Sistemi ve Döndürme Ünitesi (Component Force and Torque Measurement System and Drive System)

Gerilme ölçer (strain gauge) telin uzunluğu değişince direnci değişen bir elemandır. Gerildiğinde uzayan ve sıkıştırıldığında kısalan bir çelik silindire bağlıdır. Silindire bağlı olduğundan silindirle birlikte uzayacak veya kısalacaktır. Direnç değeri gerilme ölçerin yapıldığı telin uzunluğu ile orantılıdır. Gerilme ölçerin direnci ölçülerek yük hücresi üzerindeki yükü saptamak mümkündür. Yük hücrelerinde dört adet gerilme ölçer kullanılır. Bunlar Wheatstone köprüsü şeklinde bağlantılıdır. Rüzgar tüneline analizleri yapılacak deney numunelerinin kuvvetleri ve momentleri hızlı ve güvenilir bir şekilde ölçülebilir (Şekil 6). Hız ölçümleri için 55P014 prob kullanılmaktadır. Veriler NIDAQ -6323 A/D board ile alınmıştır.

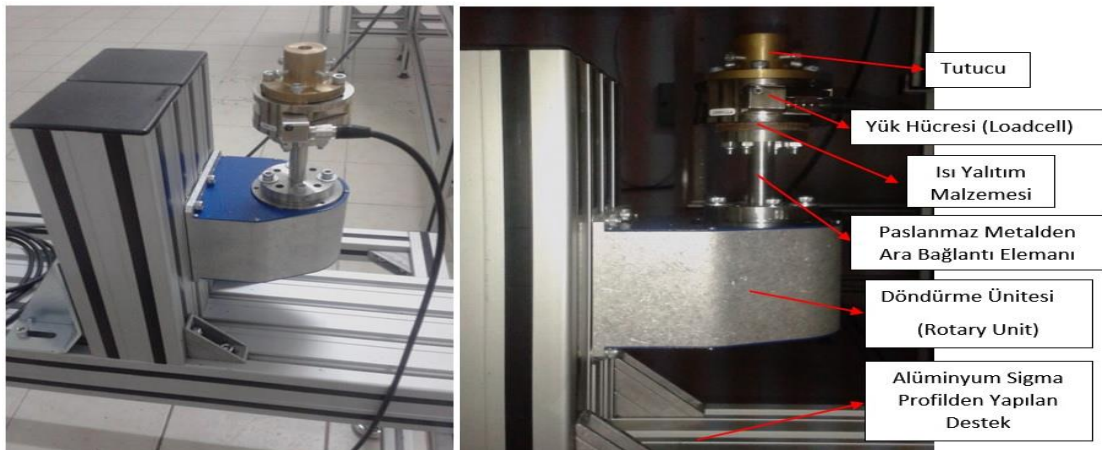
Deneylere başlamadan önce Hotwire Anemometresi ile frekans invertörünün motor frekansı ile rüzgar tünelinin akış hızı arasındaki ilişki elde edilmiştir. Çalışmanın bütün ölçümlerinden önce kullanılacak hız probunun kalibrasyonu yapılmıştır.

2.4. Kanat Profillerinin Performans Büyüklükleri

Kanat profilleri etrafında üç yönde kuvvet ve moment bileşenleri oluşur. Bu bileşenler taşıma (L), sürüklenme (D) ve yanlamasına kuvvetler (Y) ile yalpa (M_x), yunuslama (M_y) ve sapma (M_z) momentleridir. Şekil 7'de bu bileşenler bir kanat profili üstünde ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Kanat profilleri performans incelemelerinde bu bileşenlerden taşıma ve sürüklenme kuvveti ile yunuslama momenti incelenmektedir.



Şekil 7. Kanat profilinde kuvvet ve momentler (Forces and moments on airfoil)



Şekil 6. Yük hücresi ve aparatları (The load cell and apparatus)

Kanat profilleri farklı şekil ve boyutlara sahiptir. Bunun sonucu olarak kanat profillerinin avantaj ve dezavantajlarını değerlendirirken boyutsuz katsayılar dikkate alınmaktadır[2]. Taşıma ve sürüklenme katsayıları olan boyutsuz katsayılar iki boyutlu olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

Taşıma Katsayısı:

Çizelge 2. Kanat profillerinin boyut ve geometrik özellikleri (c: veter uzunluğu)
(Dimensions and properties of airfoils, c: chord distance)

Kanat Profilleri	Maksimum Kalınlık	Maksimum Kamburluk	Boyutları
NACA 63-415	15% (0.349 c)	2.2% (0.50 c)	300x300 mm
NACA 4415	15% (0.309 c)	4% (0.402 c)	300x300 mm
S826	4.3% (0.62 c)	14% (0.337 c)	300x300 mm

$$C_L = \frac{2L}{\rho V^2 c} \quad (1)$$

Sürüklenme Katsayısı:

$$C_D = \frac{2D}{\rho V^2 c} \quad (2)$$

2.5. Kanat Profillerinin Seçimi ve Üretimi (Selection and Production of Airfoils)

Kanat profili, rüzgar türbinlerinin en önemli dizayn parametrelerinden biridir. Bu yüzden rüzgar türbin santralleri kurulmadan önce kurulacak yerin yıllık ortalama rüzgar hızları hesaplanır ve bu hızlara en uygun kanat profilleri belirlenir.

Çalışmada Kayseri ilinin düşük hava hızlarında 6,8-8.1 m/sn), yüksek taşıma katsayısına sahip profilleri belirlenmiştir. Kanat profillerini seçerken National Renewable Energy Laboratory (NREL) kanat profilleri incelendi ve S800 serisi kanat profillerinin C_L/C_D oranları karşılaştırılmıştır[10]. Bunun sonucunda en iyi sonuç veren S826 birinci kanat profili olarak belirlendi. Kanat profillerinin belirlenmesi esnasında en belirleyici etken; istenilen hız aralıklarında maksimum kaldırma ve minimum sürüklenmedir.

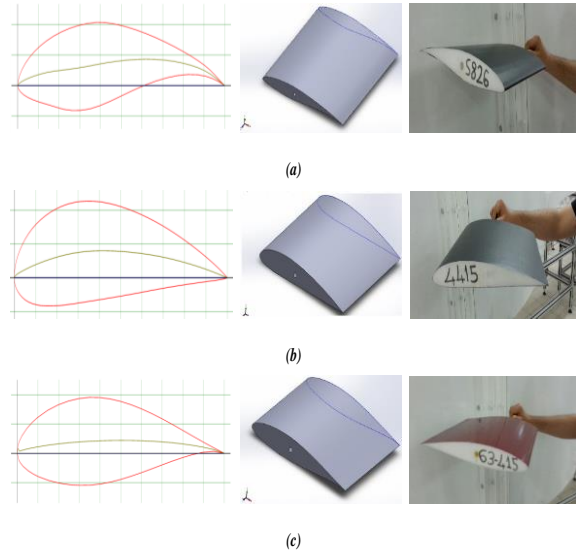
S.J. Miley'in rüzgar türbinleri için düşük Reynold sayılarında NACA 4415-4412-23012-23015-0012 kanat profilleri verileri kataloğu incelenmiştir [11]. Katalogda, profil seçimi için Reynold sayısının önemi, yüzey kalınlık etkisi ve profil üzerindeki türbülans etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak ve ikinci kanat profili olarak, NACA 4415 seçilmiştir.

Son olarak Dr. S. P. Vandan ve arkadaşlarının düşük rüzgar hız bölgelerindeki rüzgar gücü için inceledikleri NACA 63 serisi profiller, düşük hızlarda iyi bir profil karakteristiği göstermişlerdir [12]. Ayrıca NACA 63 serisi profiller için güç eğrisi düşük ve orta rüzgar hız oranlarında daha iyi sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür [13]. NACA 63 serisi profiller arasından bu çalışmalar incelenerek NACA 63-415 kanat profiline uygunluğuna karar verilmiştir.

2.6. Üretim Aşaması ve Deney Düzenekinin Kurulması (Manufacturing Process and Installation of Test Environment)

Belirlenen üç kanat profilinin SolidWorks programında çizimleri yapılmış ve AutoCAD programına aktarılmıştır. Çizelge 2 'de kanat profillerinin boyut ve geometrik özellikleri verilmiştir.

Her bir kanat profilin veter uzunluğunu rüzgar tüneli boyutlarına uygun olarak 300 mm olarak belirlenmiştir. Şekil 8'da NACA 4415, NACA 63-415 ve S826 kanat profillerinin SolidWorks programında oluşturulan 3D çizimleri verilmiştir. Oluşturulan kanat profillerinin ağırlık merkezlerinden geçen 8mm çapında delik çizilmiştir. Böylece yük hücresi (Loadcell) ile kanat profilleri arasında bağlantı çubuğu için yer oluşturulmuştur.



Şekil 8. Kanat profillerinin 2D ve 3D çizimleri ile üretilip kaplanmış halleri

(a) S826 Kanat profili (b) NACA 4415 Kanat profili
(c) NACA 63-415 Kanat profili

(2D, 3D drawings and produced states of airfoils (a) S826 airfoil (b) NACA 4415 airfoil (c) NACA 63-415 airfoil)

Kanat profillerinin CNC tezgahı ile kesimi gerçekleştirilmiştir. Kesim işlemi bilgisayar kontrollü servo motorlar ile gerçekleştirilmektedir. Kullanılan malzeme yüksek Db straforlardır.



Şekil 9. Kanat profilinin kesim işlemi (Cutting operation of the airfoil)

Kesilen kanat profillerine yük hücresi bağlantı elemanı eklenmiştir. Profil üzerindeki açıklıklara macun çekilerek yüzey düzgünlüğü ve pürüzsüzlüğü sağlanmıştır. Kaplama yapılarak hassas ölçümler elde etmek için kanat profilleri hazır hale getirilmiştir.

Kanat profilleri bağlantı çubuğu vasıtasıyla yük hücresine monte edilmiş ve kalibrasyonu yapılarak rüzgar tüneline yerleştirilmiştir (Şekil 10).

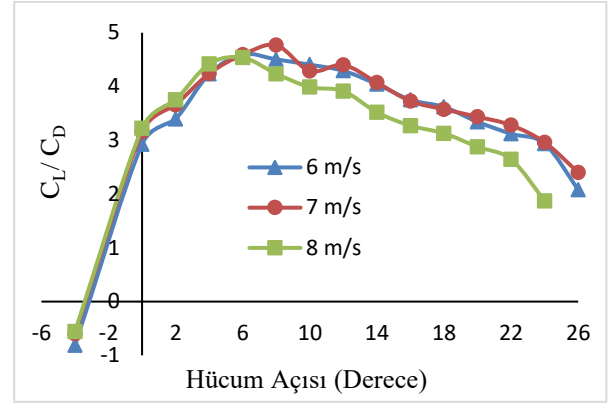


Şekil 10. S826 kanat profilinin rüzgar tüneline montaj edilmiş hali (Mounted state of S826 airfoil in the wind tunnel)

3. SONUÇLAR (RESULTS)

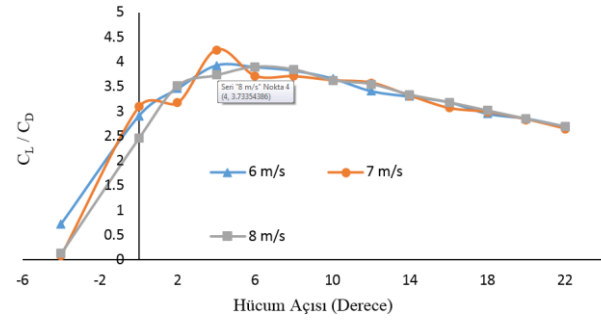
Deneylerde; 3 farklı kanat profili 3 farklı hızda (6-7-8 m/s) ve -4° ile 26° hücum açıları yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucu kanat profillerine 3 eksenli etki eden kuvvetler ve momentler ölçülmüştür. Her analizde yaklaşık 20000 adet veri kaydedilmiştir.

Şekil 11'de S826 kanat profilinin bütün hücum açıları 6-7 m/s hızlarında C_L/C_D oranlarının benzer olduğu gözlenmiştir. 8 m/s için yapılan ölçümlerde 6 derece hücum açısından sonra C_D 'nin artmasıyla C_L/C_D oranında düşüş olmuştur. S826 kanat profilinin bütün hızlarda C_L/C_D değerinin en yüksek olduğu hücum açısı 6 derecedir. 10 derece hücum açısından sonra 26 dereceye kadar C_L/C_D oranı 3'e kadar düşmektedir.



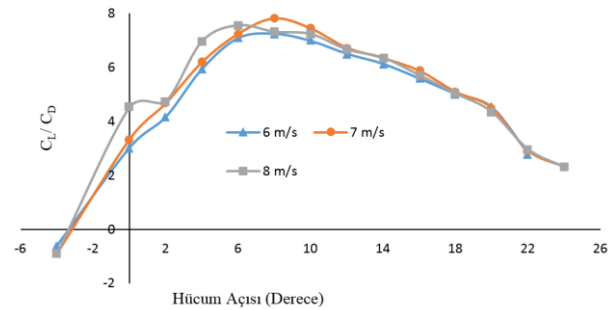
Şekil 11. S826 kanat profili için hücum açısı ile C_L/C_D değerlerinin değişimi (C_L/C_D values with the angle of attack for S826)

NACA 4415 kanat profilinde C_L/C_D oranında hızlara bağlı olarak bir değişim görülmemiştir. Hücum açısının artmasıyla 6 dereceden sonra C_L/C_D oranı diğer kanat profillerine göre daha yumuşak bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 12).

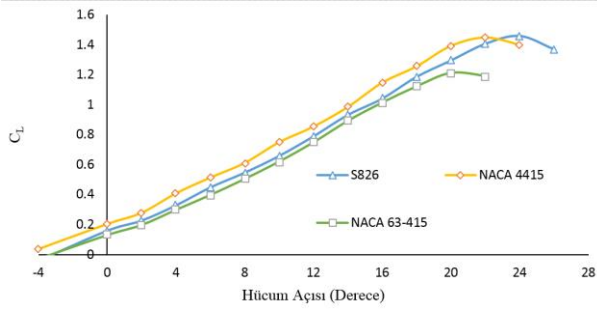


Şekil 12. Şekil 2. NACA 4415 kanat profili için hücum açısı ile C_L/C_D değerlerinin değişimi (C_L/C_D values with the angle of attack for NACA 4415)

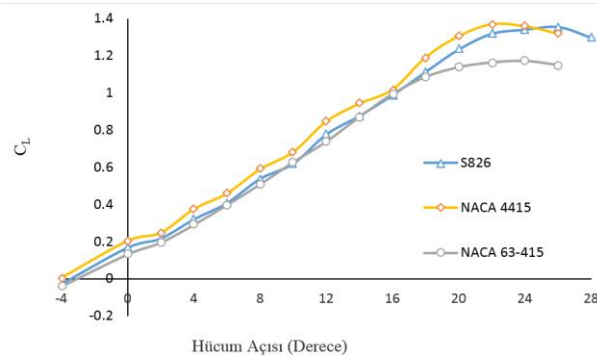
Şekil 13'de NACA 63-415 kanat profilinin -4 dereceden 6 dereceye hücum açısına kadar her bir hücum derecesindeki C_L/C_D oranı hızlı bir artış göstermektedir. 6 derecede yaklaşık 6 olan C_L/C_D oranı 20 derecede 4'e kadar düşüş göstermektedir.



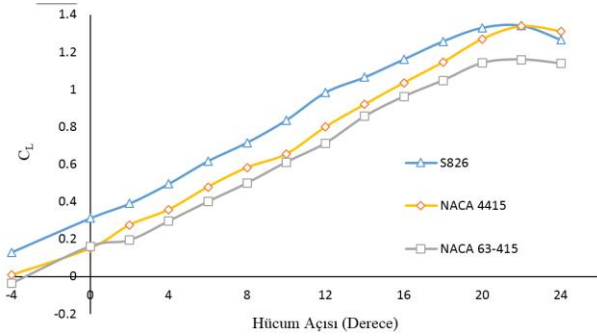
Şekil 3. NACA 63-415 kanat profili için hücum açısı ile C_L/C_D değerlerinin değişimi (C_L/C_D values with the angle of attack for NACA 63-415)



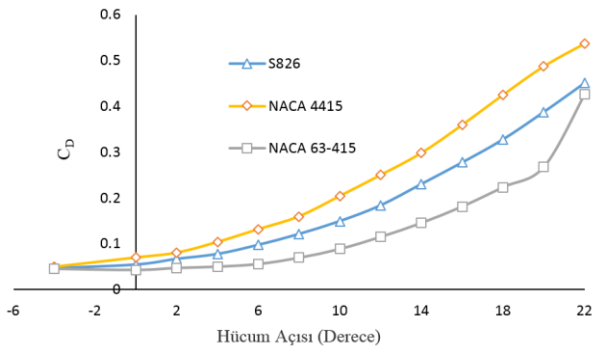
Şekil 4. Kanat profillerinin 6m/s rüzgar hızında C_L değerlerinin hücum açısı ile değişimi (C_L values of airfoils for 6 m/s wind speed)



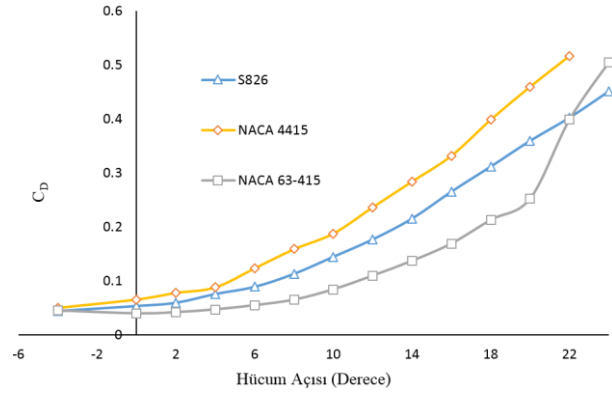
Şekil 5. Kanat profillerinin 7m/s rüzgar hızında C_L değerlerinin hücum açısı ile değişimi (C_L values of airfoils for 7 m/s wind speed)



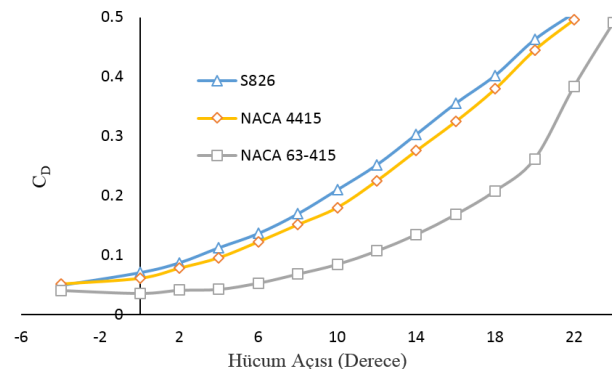
Şekil 6. Kanat profillerinin 8m/s rüzgar hızında C_L değerlerinin hücum açısı ile değişimi (C_L values of airfoils for 8 m/s wind speed)



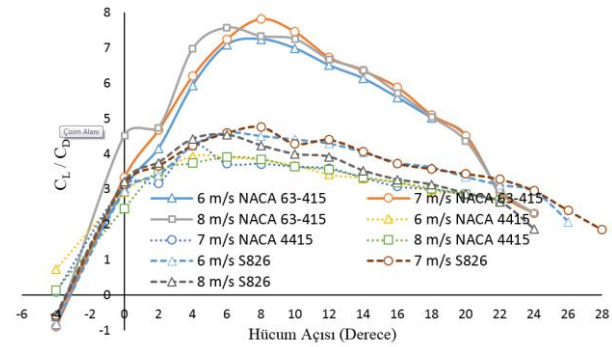
Şekil 7. Kanat profillerinin 6m/s rüzgar hızında C_D değerlerinin hücum açısı ile değişimi (C_D values of airfoils for 6 m/s wind speed)



Şekil 8. Kanat profillerinin 7m/s rüzgar hızında C_D değerlerinin hücum açısı ile değişimi (C_D values of airfoils for 7 m/s wind speed)



Şekil 9. Kanat profillerinin 8m/s rüzgar hızında C_D değerlerinin hücum açısı ile değişimi (C_D values of airfoils for 8 m/s wind speed)



Şekil 20. Hücum açısı ile C_L/C_D değerlerinin değişimi (C_L/C_D values with angle of attack)

Rüzgar türbini tasarımında kanatçık sayısından çok kanat profilinin kesit alanı büyük önem taşımaktadır[14]. Verimi artırabilmek için maksimum C_L/C_D (minimum sürükleme ve maksimum taşıma) oranı istenmektedir. Çünkü rüzgar türbinleri kullanım ömürleri boyunca daimi hava akımlarına sahip değillerdir. Hava akımından elde edecek maksimum güç C_L/C_D oranlarına bağlıdır.

Şekil 20'de tüm kanat profillerinin C_L/C_D değerlerinin hücum açısı ile değişimi verilmiştir Yaklaşık 6° ile 10° hücum açısı aralıklarında tüm profillerde C_L/C_D değeri maksimuma ulaşmıştır. NACA 63-415 kanat profilinin 6-7 m/s hızlarında diğer kanat profilleri ile C_L değerleri benzerlik göstermektedir (Şekil 14-15). 8 m/s hızında ise

bir miktar fark olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 16). Fakat NACA 63-415 kanat profilinin C_D değerlerinde Şekil 17-19 dan gösterildiği üzere çok düşük olduğundan dolayı C_L/C_D oranları yüksek çıkmıştır. İncelen verilere göre Kayseri ili için yapılması düşünülen düşük hızlarda (6-7-8 m/s) çalışacak RES'ler için uygun olan kanat profili NACA 63-415 olduğu sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışma; TÜBİTAK ve Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Birimi tarafından FYL-2015-5733 kodlu projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Chen J., Wang Q., Zhanga S., Eecen P., Grasso F., "A new direct design method of wind turbine airfoils and wind tunnel experiment," *Applied Mathematical Modelling*, 40, (2016).
2. Şahin İ. ve Acır A., "Numerical and experimental investigations of lift and drag performances of NACA 0015 wind turbine airfoil," *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, 3(1): 22-25, (2015).
3. Yao J., Yuan W., Wang J., Xie J., Zhou H., Peng M., Sun Y., Numerical simulation of aerodynamic performance for two dimensional wind turbine airfoils," International Conference on Advances in Computational Modeling and Simulation, *Procedia Engineering* 31: 80 – 86, (2012).
4. Cohan A. C., Arastoopour H., "Numerical simulation and analysis of the effect of rain and surface property on wind-turbine airfoil performance," *International Journal of Multiphase Flow*, 81: 46–53, (2016).
5. Cosker J., "Design and optimization of a small wind turbine," *Yüksek Lisans Tezi*, Rensselaer Polytechnic Institute, Hartford, Connecticut, (2012).
6. Maulana M. I., Qaedy T. M., Nawawi M., Design analysis of vertical wind turbine with airfoil variation, Proceeding of the 4th International Conference and Exhibition on Sustainable Energy and Advanced materials (ICE-SEAM 2015), 1717, (2016);
7. Güleren, K. M., Demir, S., "Rüzgar türbinleri için düşük hücum açılarında farklı kanat profillerinin performans analizi", *Journal of Thermal Science and Technology*, 31(2): 51-59, (2011).
8. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, REPA (Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası), Erişim Tarihi: 03/02/2015.
<http://www.eie.gov.tr/yenilenebilir/ruzgar.aspx>
9. T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü, Kayseri İl Bazlı Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) 03/02/2015.
<http://www.eie.gov.tr/YEKrepa/KAYSERI-REPA.pdf>
10. Mohamed A. S., Hamdy A. K., Shaltot, A., "Aerodynamic analysis of different wind-turbine-blade profiles using finite-volume method", *Energy Conversion and Management*, 64: 541–550, (2012).
11. S. J. Miley, "A Catalog of Low Reynold Number Airfoil Data For Wind Turbine Applications", Prepared by Department Of Aerospace Engineering Texas A&M University Collage Station, February, (1982).
12. Vandan, S. P., Lovelin S. A., M. Manibharathi and C. Rajkumar, "Analysis of a Wind Turbine Blade Profile for Tapping Wind Power at the Regions of Low Wind Speed", *International Journal of Mechanical Engineering*, ISSN : 2277-7059, 2(2): (2012).
13. Stiesdal, H., "The Wind Turbine Components and Operation" Danimarka, (1999).
14. Hepperle M., "Aerodynamic Design of a Windmill," Web sitesi: <http://www.mh-aerotoools.de/airfoils/windmill.htm>, Erişim tarihi: 06/05/2016.

A356 Alaşımında Cu Miktarının Mikroyapı ve Aşınma Davranışı Üzerine Etkisi

Tansel TUNÇAY

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü, 34469, Balıklarkayası, Karabük

(Geliş / Received : 25.04.2016 ; Kabul / Accepted : 15.06.2016)

ÖZ

Bu çalışmada, farklı oranda (%0.1-0.4 Ağ.) Cu ilave edilen A356 alaşımları döküm yöntemi ile üretilerek, Cu miktarının A356 alaşımının mikro yapı ve aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üretilen A356 alaşımlarına yaşlandırma (T6) ısıl işlemi yapılmıştır. Alaşımların mikro yapıları optik mikroskop (OM), tarama elektron mikroskobu (SEM), X-ışınımı kırınımı analizi (XRD) ve sertlik ölçümleri ile incelenmiştir. Aşınma testleri pin-on tipi aşınma test cihazında farklı yük (10, 20 ve 30 N) 1 ms⁻¹ kayma hızı ve farklı kayma mesafesi (500, 1000, 1500 ve 2000 m.) kullanılarak test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarı arttıkça Al-Si ötektik morfolojisinin incelendiği ve yapıda homojen dağıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, yapıda oluşan demir bazlı intermetalikler de incelenmektedir. A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarının artmasına bağlı olarak mikro yapıda oluşan Al₂Cu çökeltilerinin (yaşlandırma nedeniyle) miktarı ve alaşımların sertlikleri artmaktadır. Aşınma testleri sonucunda 10 ve 20 N yük altında en düşük aşınma oranları %0.2 ve 0.4 Cu ilaveli A356 alaşımında, 40 N yük altında %0.4 Cu ilaveli A356 alaşımında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: A356 alaşımı, mikro yapı, aşınma davranışı.

Effect of Cu Content on Microstructure and Wear Behaviour in A356 Alloy

ABSTRACT

In this study, A356 alloys with various amount of Cu (0.1-0.4 wt. %) were produced by casting and the effects of Cu content on the microstructure and wear behaviour of these alloys were investigated. T6 heat treatment was applied to the produced A356 alloys. The microstructures of the produced A356 alloys were examined by optical microscope (OM), scanning electron microscopy (SEM), X-Ray diffraction analysis (XRD) and hardness measurements. Wear tests were carried out on a pin-on disk type wear apparatus at 1 ms⁻¹ sliding speed for different sliding distances (500, 1000, 1500 and 2000 m) under different loads (10, 20 and 30 N). The results showed that the morphology of Al-Si eutectic was refined and distributed uniformly in the microstructure with increasing Cu amount. In addition, iron-based intermetallic phases formed in the microstructure were also seen to be refined. With increasing Cu amount added to A356, the amount of Al₂Cu precipitates (due to aging) and the hardness values of the alloys increased. According to the wear test results, while the lowest wear rates were obtained for A356 alloys with 0.2% and 0.4% Cu under 10 and 20 N loads, the lowest wear rate under 40 N load was obtained for A356 alloy with 0.4% Cu content.

Keywords: A356 alloy, microstructure, wear behaviour.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

A356 (Al-Si-Mg) alüminyum alaşımı yüksek dayanım/ağırlık oranı, üstün dökülebilirlik özellikleri ve yaşlandırma ile mekanik özellikleri iyileştirilebildiğinden dolayı, otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan alaşımlardır [1]. Bu alaşımların çekme, darbe ve yorulma dayanımı gibi mekanik özelliklerinin yanında aşınma direnci de büyük önem taşımaktadır. Malzemelerin mekanik özellikleri, tane boyutu ve şekli, intermetalik fazların oluşumu ve oluşan fazların boyut ve dağılımları gibi mikro yapısal faktörlere bağlıdır. Al alaşımlarına bakır, silisyum ve magnezyum gibi farklı elementler ilave edilerek ve uygun yaşlandırma ısıl işlemi (T6 gibi) ile dayanımları artırılabilir.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: tanseltuncay@karabuk.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 585-592

Alaşımların bileşiminde bulunan magnezyum ve silisyum miktarına bağlı olarak oluşan Mg₂Si fazı ile bakır miktarına bağlı olarak oluşan Al₂Cu fazları mekanik özellikleri iyileştirmektedir [2]. Solüsyona alma, hızlı soğutma ve yaşlandırma aşamalarından oluşan yaşlandırma ile Al-Si-Cu-Mg alaşımlarının mekanik özellikleri geliştirilmektedir [3]. Al-Si ötektik alaşımlarına ilave edilen Cu ve Fe'in miktarına bağlı olarak katılaşma ve ısıl işlem ile Cu ve Fe'ce zengin fazlar oluşmaktadır. Katılaşma sırasında oluşan demir bazlı intermetalikler plaka veya çinçe yazıya benzeyen şekindedir. Bakır bazlı çökeltiler ise α- alüminyum dendritleri tane sınırlarında küresel şekilde oluşmaktadır. Alaşımların yapısında farklı morfolojilerde oluşan bu fazlar, maksimum çekme mukavemeti ve yüzde uzama değerlerini artırmaktadır [4]. Endüstriyel amaçlı birçok uygulamada alüminyum alaşımlarından üretilen parçalar, değişen yüklerde ve sıcaklıklarda ciddi aşınma

şartlarında görev yapmaktadır. Bu nedenle, aşınma direnci bu alaşımlarda istenilen bir özelliktir ve bu alaşımlardan üretilen parçaların servis ömrünü artırmak için gereklidir. Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini ve aşınma direncini etkileyen en önemli parametreler ise tane boyutu ve yapısı, inklüzyonlar, çökeltiler, intermetalik fazlar ve yapıda oluşan boşluk miktarıdır [5]. Kori ve Prabhudev yaptıkları bir çalışmada, A356 ve 0.5% Cu ilaveli A356 alaşımlarının aşınma testlerinde kayma hızı ve mesafesindeki artışa rağmen, aşınma oranının iyileştirildiğini belirtmektedirler [6]. Bu çalışmada, döküm yöntemi ile farklı miktarlarda Cu (%0.1, 0.2 ve 0.4 Ağ.) ilave edilerek üretilen A356 alaşımlarında, Cu miktarının alaşımların mikro yapıları ve yapıda oluşan fazların, alaşımların aşınma davranışları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

2. MALZEME VE METOT (MATERIALS AND METHOD)

DeneySEL çalışmalarda kullanılan A356 alaşımı ve elektrolitik bakırın kimyasal bileşimi Çizelge 1'de verilmiştir. Ergitme işlemlerinde grafit potali ve 12 kW gücünde elektrik direnç ocağı kullanılmıştır. A356 alaşımı ergitildikten sonra, %0.1, 0.2 ve 0.4 Cu bileşimine ulaşmak için hesaplanan miktarda elektrolitik bakır (Cu) sıvı metale ilave edilerek aynı sıcaklıkta (ergimesi ve homojen karışmasının sağlanması) için 10 dak. bekletilmiştir. 60-70 AFS tane iriliğine sahip silis kum, reçine ve sertleştirici ilave edilerek hazırlanan kalıplarda, sıvı metalin hazırlanması ve aktarılması sırasında oluşması muhtemel inklüzyonların uzaklaştırılması için (20 ppi) seramik köpük filtreler kullanılmıştır. Ergitilen sıvı metal hazırlanan kum kalıplara, 730-740 °C sıcaklıkta dökülmüştür. Döküm işlemi sonrasında kimyasal analizlerin belirlenmesinde OBLF GS-1000 spektral analiz cihazı kullanılmıştır.

Çizelge 1. Çalışmada kullanılan A356 ve elektrolitik bakırın kimyasal bileşimi (Chemical composition of A356 and electrolytic cooper are used in study)

Alaşım	Elementler (% Ağ.)							
	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ti	Zn	Al
A356	7.20	0.392	0.18	-	0.001	0.120	0.005	Kalan
Elektrolitik Bakır	-	-	-	99.99	-	-	-	-

Döküm işlemleri tamamlandıktan sonra, üretilen farklı Cu bileşimine sahip A356 alaşımlarına T6 ısıl işlemi yapılmıştır. T6 ısıl işlemi için üretilen alaşımlar 540 °C'de 8 saat solüsyona alınarak suda hızlı soğutulmuştur. Oda sıcaklığına hızlı soğutulan alaşımlara 24 saat doğal ve 170 °C'de 10 saat yapay yaşlandırılma ısıl işlemi yapılmıştır. Farklı miktarlarda Cu içeren döküm A356 alaşımları optik mikroskop incelemeleri için (ASTM E04.01 standardına göre) metalografik işlemler yapılmıştır. Hazırlanan numuneler Keller solüsyonu (2ml HF (48%) + 3ml HCl + 5ml HNO₃ + 190ml H₂O) ile 30-45 sn. dağlanmıştır. Optik mikroskop incelemeleri,

MEIJI marka optik mikroskop ve MSQ PLUS 6.5 görüntü analiz programında yapılmıştır. Ayrıca, karakterizasyon çalışmalarında Carl Zeiss Ultra Plus Gemini (FEG) marka taramalı elektron mikroskobu ve Rigaku Ultima IV X-Ray Diffractometer (XRD) cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümlerinde SHIMADZU marka mikro sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Alaşımların sertlikleri, bütün alaşım gruplarında 2 N yük altında, 2 farklı numuneden 10 adet sertlik ölçümünün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Üretilen alaşımların yoğunlukları Arşiment prensibine göre Precisa marka yoğunluk ölçüm kitinde yapılmıştır. Aşınma testlerinde, standart pin-on tipi aşınma test cihazı kullanılmıştır. Aşınma testleri, ASTM G99-05 standardına göre yapılmıştır. Aşınma testlerinde 1ms⁻¹ kayma hızı, üç farklı yük (10, 20 ve 40 N) ve dört farklı kayma mesafesi (500, 1000, 1500 ve 2000 m) kullanılmıştır. Bütün alaşım gruplarından 3 adet numuneye aşınma testi uygulanmıştır. Elde edilen ağırlık kaybı verilerinin ortalaması alınmıştır. Aşınma testlerinde, test öncesinde aşındırıcı disk ve numune yüzeyleri aseton ile temizlenmiştir. Aşındırılan numuneler hassas terazide tartılarak, ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Aşınma testlerinde karşılık malzemesi olarak, Ø230 mm çapında, 20 mm kalınlığında ve 60-64 HRC sertliğinde AISI 4140 çelik disk kullanılmıştır. Aşınma testleri tamamlandıktan sonra, numune yüzeyleri SEM ile incelenmiştir. Aşınma oranı hesaplamalarında Eşitlik 1. kullanılmıştır.

$$W_a = \frac{\Delta G}{d \times P \times S} \dots \dots \dots (1)$$

Burada, W_a aşınma oranı (mm³/Nm), ΔG ağırlık kaybını (gr), d yoğunluk (gr/cm³), P aşınma testinde uygulanan yük (N) ve S aşınma mesafesidir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mikroyapı İncelemeleri (Microstructure Examination)

Farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımlarının döküm işlemleri sonrasındaki kimyasal bileşimleri Çizelge 2 'de verilmiştir.

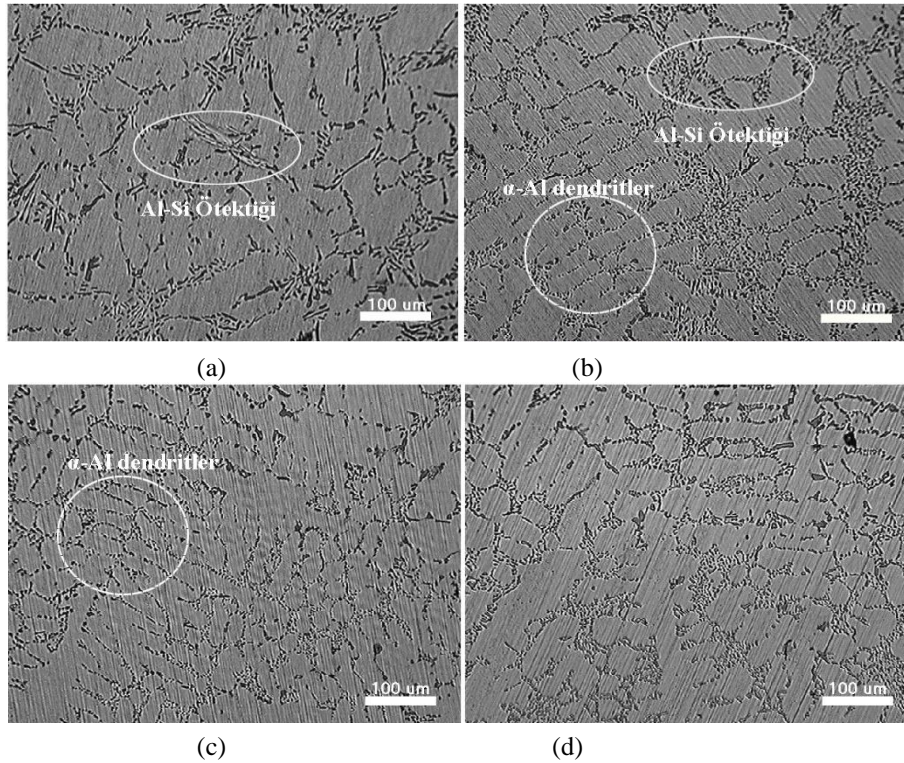
Çizelge 2. Farklı miktarda Cu içeren A356 alaşımlarının kimyasal bileşimleri (Chemical composition of A356 alloys with various Cu amount)

Alaşım Grupları	Elementler (%Ağ.)							
	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ti	Zn	Al
A356	7.21	0.375	0.19	-	0.001	0.120	0.005	
Cu 0.1	7.83	0.37	0.125	0.103	0.001	0.106	0.005	Kalan
Cu 0.2	7.6	0.379	0.14	0.218	0.001	0.108	0.005	
Cu 0.4	7.64	0.35	0.129	0.392	0.001	0.106	0.0051	

Şekil 1’de farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımlarının optik mikroskop (OM) görüntüleri verilmiştir. Bu OM görüntüleri incelendiğinde, Cu miktarına bağlı olarak meydana gelen mikro yapısal değişimler görülmektedir. A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarının artmasıyla Si parçacık boyutlarının azalarak incelendiği ve morfolojisinin lameler (fibrous) yapısının küresele doğru değiştiği gözlenmektedir. Ayrıca dendritlerin daha düzenli gelişerek, ikincil dendrit kollar arasındaki mesafe de (SDAS) azalmaktadır. SDAS A356 alaşımında 31 μm , 0.1 Cu ilave edildiğinde 26 μm , 0.2 Cu ilave edildiğinde 24 μm ve 0.4 Cu ilave edildiğinde ise 23 μm olarak ölçülmüştür. Yaşlandırılmış Al-Si-Mg alaşımlarının mikro yapısı α -alüminyum dendritler, Al-Si ötekliği, Fe bazlı

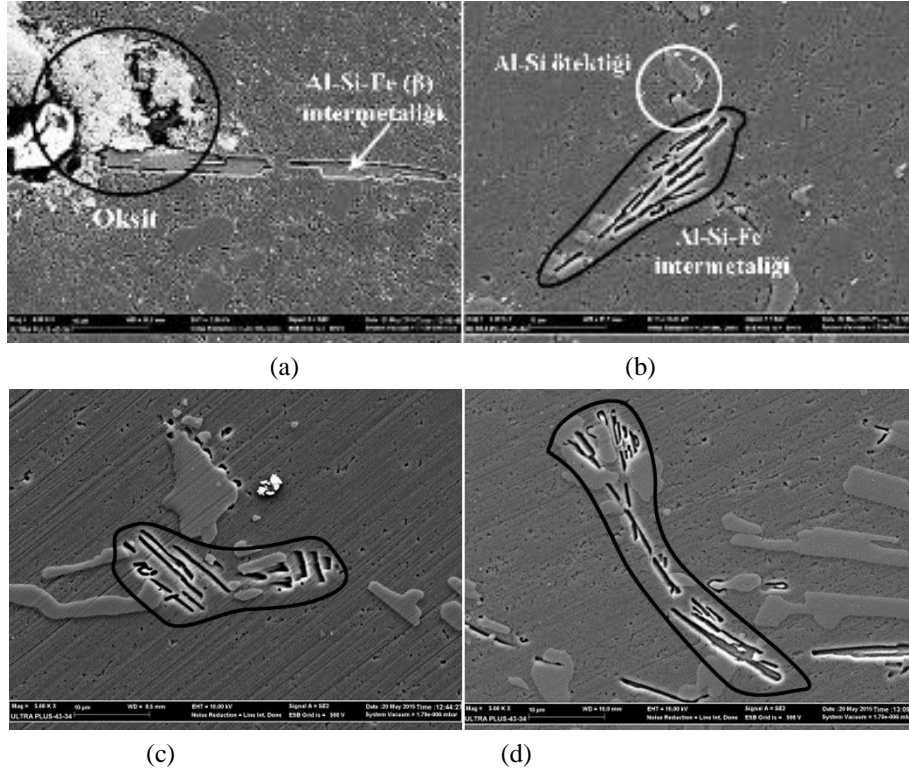
intermetalikler (Fe miktarına bağlı olarak) ve yaşlandırma Mg_2Si fazından oluşmaktadır [8].

Şekil 2’de farklı Cu oranlarındaki A356 alaşımlarının SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, alaşımların katılaşması sırasında yapıda demir bazlı intermetaliklerin oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu intermetalik fazlar içerdikleri demir miktarına ve morfolojisine göre sınıflandırılmaktadır. Genellikle bu fazlar çubuk şekilli β - $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Si}$, ve $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ve $\text{Al}_{19}\text{Fe}_4\text{MnSi}_2$ fazlardır [9]. Bu intermetalik fazlar özellikle döküm malzemelerin yapısındaki hataların olduğu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Çubuk şekilli β - $\text{Al}_5\text{Fe}_2\text{Si}$ fazı, $\text{Al}_8\text{Fe}_2\text{Si}$ ve $\text{Al}_{19}\text{Fe}_4\text{MnSi}_2$ fazlarına göre daha kalın ve keskin köşelidir. A356 alaşımının SEM

**Şekil 1.** Farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımının OM görüntüleri; A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) ve Cu 0.4 (d) (OM images of A356 alloys with various Cu amount; A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) and Cu 0.4 (d))

görüntüsünde (Şekil 2a) oksit ve silisyum parçacıkları çevresindeki kusurlu bölgede çekirdeklenen β - $\text{Al}_3\text{Fe}_2\text{Si}$ fazı görülebilmektedir. %0.1, 0.2 ve 0.4 Cu içeren alaşım sistemlerinde ise demir bazlı intermetaliklerin incelendiği ve alüminyum matriste homojen olarak dağıldığı anlaşılmaktadır.

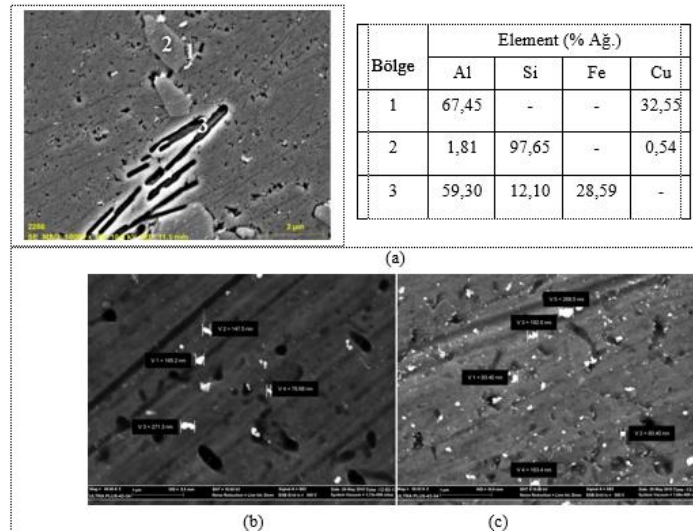
3a) Al-Si ötektığı (1.nokta), çevresinde bakır ilavesi ve yaşlandırma ısıl işlemine bağlı olarak oluşan Al_2Cu çökelti fazı (2.nokta), demir intermetalığı (3.nokta) olduğu görülmektedir. Ayrıca %0.2 Cu (Şekil 3b) ve %0.4 Cu içeren A356 alaşımının (Şekil 3c) SEM görüntüleri. %0.2 ve 0.4 Cu miktarına sahip A356



Şekil 2. Farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımının SEM görüntüleri; A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) ve Cu 0.4 (d) (SEM images of A356 alloys with various Cu amount; A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) and Cu 0.4 (d))

Farklı Cu miktarına sahip A356 alaşımlarının dayanımının artırılması için T6 ısıl işlemi yapılmıştır. Şekil 3'te yaşlandırılan alaşımların SEM görüntüleri ve EDS analizi sonucu verilmektedir. % 0.1 Cu içeren A356 alaşımının SEM görüntüsü ve EDS analizlerinde (Şekil

alaşımlarında yapıda oluşan nano boyutlu Al_2Cu çökeltileri görülmektedir. Cu miktarının artması ile yapıda oluşan Al_2Cu çökeltilerin boyutları ve hacimsel miktarı da artmaktadır. %0.2 Cu A356 alaşımında Al_2Cu çökeltilerin boyutları 76-271nm olarak ölçülürken, %0.2



Şekil 3. Cu 0.1 alaşımı SEM görüntüsü ve EDS analizi sonucu (a), Cu 0.2 (b) ve Cu 0.4 alaşımlarının SEM görüntüleri. (SEM image and EDS result of Cu 0.1 alloy (a), SEM image of Cu 0.2 alloy (b) and SEM image of Cu 0.4 alloy

Cu A356 alaşımında 94-269 nm olarak ölçülmüştür. Al_2Cu çökeltilerin minimum ve maksimum boyutları hemen hemen yakın olmasına rağmen boyutsal dağılımları farklıdır.

Farklı Cu miktarına sahip A356 alaşımlarının içerdiği fazların belirlenmesi için yapılan XRD analizi sonucu Şekil 4'te verilmektedir. Alaşımların yapısında Al matris fazı (2θ yansıma açısı, açısı 39, 43 ve 64°), Al_2Si ötektik fazı (2θ yansıma açısı, 39, 43, 64, 112 ve $116-117^\circ$) oluşmaktadır. Ayrıca Cu ilave edilmemiş A356 alaşımında Mg_2Si fazı (2θ yansıma açısı) 64° ve 78° oluşurken, Cu ilave edilen A356 alaşımlarında Al_2Cu fazının (2θ yansıma açısı) 27, 38, 42, 47, 57, 79 ve 99° olduğu belirlenmiştir. Özellikle bakır ilavesinin artması ile Al_2Cu fazı pik yüksekliklerinin (2θ yansıma açısı, 27 ve 38°) arttığı görülmektedir. A356 alaşımının %0.4 bakır ilavesi sonrasında Al-Si ötektiklerinin pik yüksekliğindeki artış dikkat çekmektedir. Bunun yanı sıra, Cu ilavesi ile yapıda oluşan $\beta-Al_5FeSi$ intermetalik fazının ve Al_8Fe_2Si intermetalik fazı arasında faz ve morfolojik dönüşümün gerçekleştiği düşünülmektedir. $\beta-Al_5FeSi$ intermetalik fazının oluşumunu %0.1 ve 0.2 Cu içeren alaşım sisteminde azalırken (2θ yansıma açısı, 38°) %0.4Cu içeren A356 alaşımında ise aniden artmaktadır. Lee vd., farklı demir içeriğine sahip Al-Si alaşımlarında $\beta-Al_5FeSi$ intermetalik fazının $\alpha-Al_8Fe_2Si$ intermetalik fazına dönüştüğünü belirtmektedirler [10]. Başka bir çalışmada ise, Sivarupan vd., düşük silis ve yüksek demir oranına sahip Al-Si-Cu-Mg-Fe alaşım sistemlerinde Cu ilavesinin artması ile tane inceltme etkisinin ve mikroyapı morfolojisini değiştirdiğini

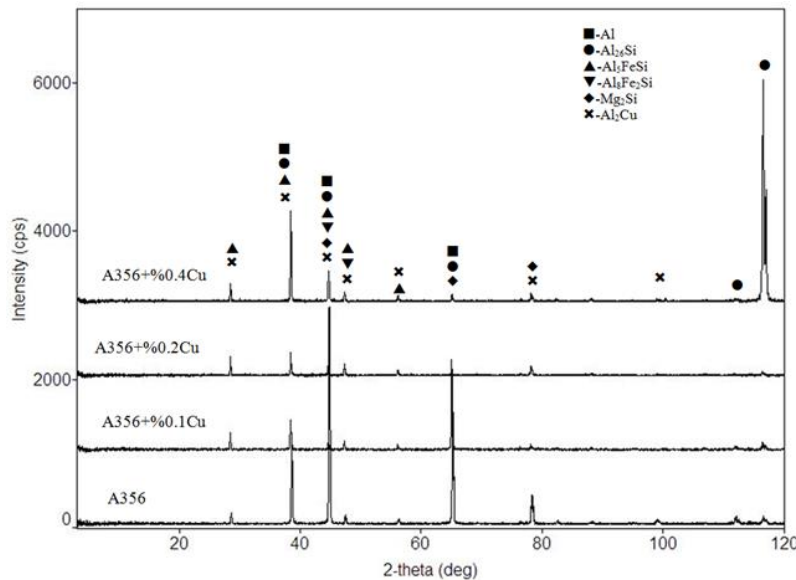
sertlik değerlerinin bir miktar arttığı görülmektedir. Bunun sebebi yaşlandırma ile yapıda oluşan Al_2Cu fazıdır (Şekil 3). Oluşan Al_2Cu çökeltileri boyut ve dağılımına bağlı olarak sertlik değerlerindeki S.S'nin arttığı düşünülmektedir.

Çizelge 3. Farklı Cu miktarına sahip A356 alaşımlarının sertlik sonuçları (Hardness result of A356 alloys with various Cu amount)

Alaşım Grupları	Sertlik (HVM0.2)	
	O.S.S	S.S (\pm)
A356	90	5.4
Cu 0.1	93	7.9
Cu 0.2	99	5.6
Cu 0.4	100	12.0

Aşınma Davranışı (Wear Behaviour)

Bir malzemenin mekanik özellikleri ve aşınma davranışı, mikro yapıyı oluşturan fazlar ve faz miktarları ile doğrudan ilgilidir. Farklı miktarda Cu miktarına sahip A356 alaşımlarının üç farklı yük altındaki ağırlık kayıpları ve aşınma oranları Şekil 5'te verilmiştir. Ağırlık kaybı grafikleri incelendiğinde, 10 ve 20 N yük altında en düşük ağırlık kaybı 0.2 ve 0.4 Cu alaşımlarında elde edilirken, 40 N yük altında ise 0.4 Cu alaşımında elde edilmiştir. Bununla birlikte, 40 N yük altında Cu ilave edilmeyen A356 alaşımı da hemen hemen 0.4 Cu alaşımına yakın ağırlık kaybı elde edilmiştir. Bunun sebebi, sürtünme sırasında meydana gelen deformasyon etkisi ile yumuşak matristen kopan parçacıkların tekrar yüzeye yapışmasıdır. Chen vd. tarafından yapılan bir çalışmada, Al-12.5Si-1.0Mg alaşımlarında 10N yük altında aşınma oranının bakır ilavesinden bağımsız

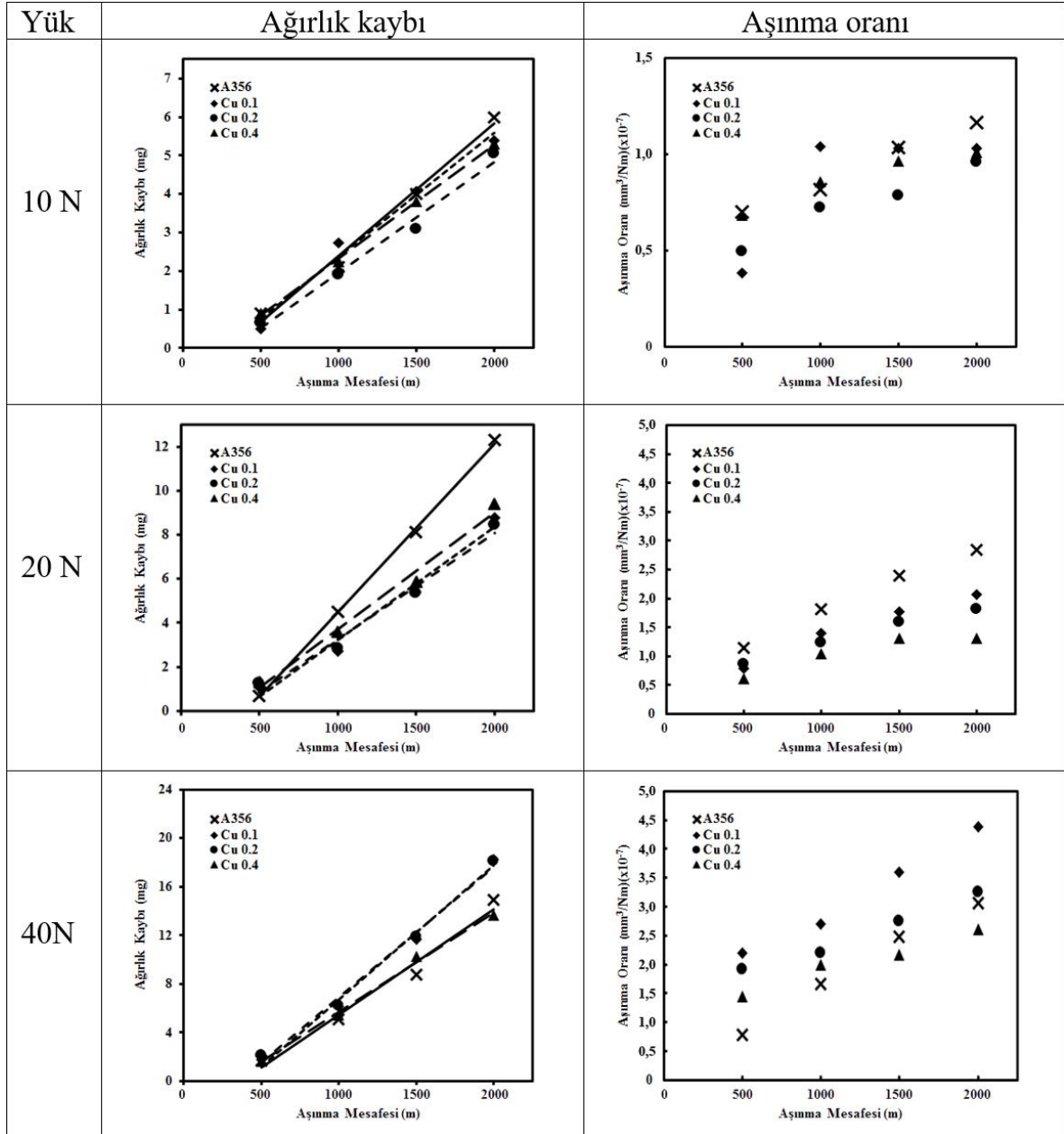


Şekil 4. Farklı miktarlarda Cu ilave edilen A356 alaşımlarının XRD analizi sonuçları.(XRD analysis result of A356 alloys with various Cu amount)

vurgulamaktadırlar [11]. Chen vd., Mg_2Si fazının Cu ilavesi ile oluşmasının azaldığını not etmişlerdir [12].

Farklı Cu miktarına sahip alaşımların ortalama sertlik sonuçları (O.S.S) ve standart sapmaları (S.S.) Çizelge 3'de verilmiştir. Cu miktarının artmasına bağlı olarak

olarak değiştiğini, fakat 40N yük altında ise Cu miktarının artmasıyla aşınma direncinin iyileştirildiği belirtilmiştir [12]. Test edilen alaşımlarda ağırlık kaybı, aşındırıcı disk ve test malzemesi arasındaki teması bağlı olarak gelişmektedir. Uygulanan yükünün artmasına bağlı olarak, ağırlık kaybı da artmaktadır.

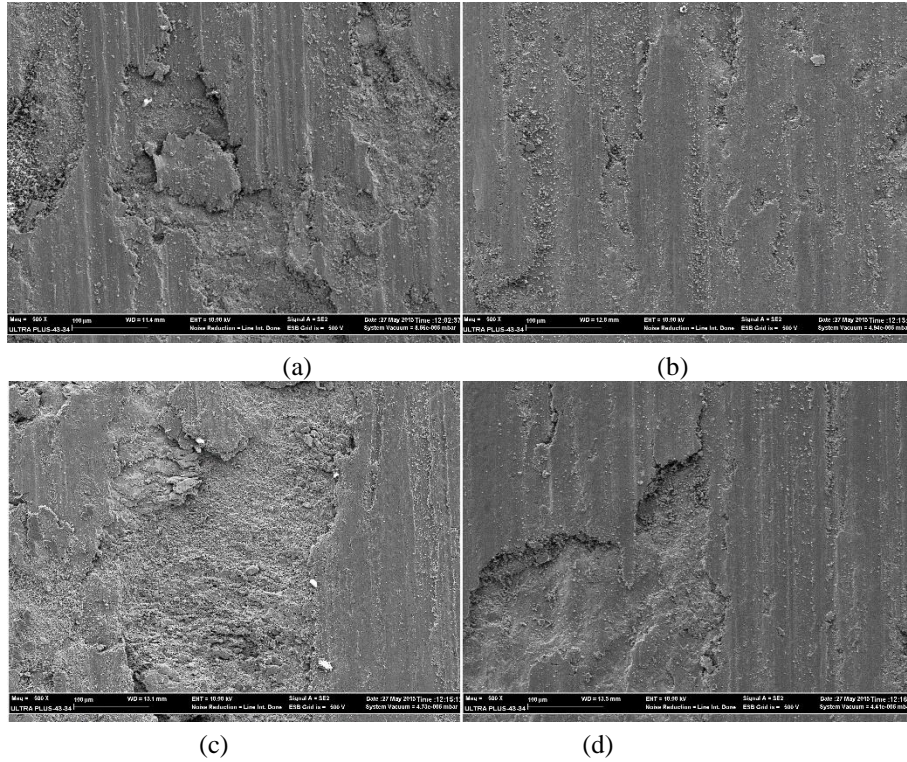


Şekil 5. Farklı Cu içerikli A356 alaşımların farklı yüklerdeki ağırlık kaybı ve aşınma oranı grafikleri (Wear loss and wear rate graphics of A356 with various Cu amount, in different load)

Ayrıca, Al-%13Si alaşımlarına ilave edilen Mg miktarına bağlı olarak yapıda oluşan Mg_2Si fazı da aşınma davranışını iyileştirmektedir [13]. Şekil 5’de verilen aşınma oranı sonuçları incelendiğinde, 10 N yük altında 0.2 Cu alaşımının, 20 ve 40 N yük altında 0.4 Cu alaşımının aşınma oranlarının daha düşük olduğu görülmektedir. 10 N yük altında 0.2 Cu alaşımının aşınma oranının özellikle 1000- 2000 m. mesafelerde 0.4 Cu alaşıma göre düşük olmasının sebebi, yaşlandırma ile yapıda oluşturulan Al_2Cu fazından kaynaklanmaktadır. Çizelge 3 de verilen sertlik sonuçları da bu sonuçları desteklemektedir.

Şekil 6’da farklı Cu içerikli A356 alaşımlarının 40 N yük altında 2000 metre kayma mesafesi sonunda elde edilen

aşınma yüzeyi SEM görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülerde numune ve disk arasındaki sürtünme etkisi ile yüzeylerde ağır deformasyon meydana geldiği görülebilmektedir. Özellikle Cu ilavesiz A356 alaşımın aşınma yüzeyinde (Şekil 6a), sürtünme sırasında yüzeyden kopan parçacıkların tekrar yüzeye yapışarak sıvandıği anlaşılmaktadır. Aynı etki diğer alaşımlarda da gözlenmektedir. Ayrıca aşınma yüzeylerinde çizikler ve dökülmeler de gözlenmektedir. Genel olarak yüzeylerde adhezif aşınma mekanizmasının aktif olduğu, bununla birlikte kısmen abrasif aşınmanın da olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6. 40 N yük altında aşınma testi uygulanan A 356 alaşımların aşınma yüzeyleri SEM görüntüsü. A356 (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) ve Cu 0.4 (d) (Worn surfaces SEM images of A356 alloys (a), Cu 0.1 (b), Cu 0.2 (c) and Cu 0.4 alloy (d), under 40 N load)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, farklı Cu miktarına sahip A356 döküm alaşımlarının mikro yapısı ve aşınma davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarının (%0.1 ile 0.4) artması ile yapıda oluşan Al_2Cu intermetaliklerin boyutu ve miktarı artmaktadır. Ayrıca Al-Si ötektığının yapısı da incelenmektedir.
- A356 alaşımına ilave edilen Cu miktarının artmasıyla alaşımın sertliğinde yaklaşık %10 artış olmaktadır.
- Aşınma testinde uygulanan yükün artması ile ağırlık kaybının arttığı belirlenmiştir. 10 ve 20 N yük altında en düşük ağırlık kaybı %0.2 ve %0.4 Cu alaşım gruplarında olmasına karşın, 40N yük altında ise A356 ve %0.4 Cu alaşım sistemlerinde elde edilmiştir.
- Aşınma testleri sonucunda en düşük aşınma oranları 10N yük altında %0.4 Cu alaşımında, 20 N yük altında A356 alaşımlarında, 40 N yük altında ise %0.4 Cu alaşımında elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Bu çalışmaya KBÜ-BAP-14/1-YL-013 nolu proje kapsamında destek sağlayan Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimine desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Edwards K.L., "Strategic substitution of new materials for old: Applications in automotive product development", *Materials and Design*, 25: 529–533, (2004).
- [2] Reif W., Dutkiewicz J., Ciach R., Yu S., Krol J., "Effect of ageing on the evolution of precipitates in AlSiCuMg alloys", *Materials Science and Engineering A*, 234–236: 165-168, (1997).
- [3] Wang G., Bian X., Wang W., Zhang J., "Influence of Cu and minor elements on solution treatment of Al–Si–Cu–Mg cast alloys", *Materials Letter*, 57: 4083–4087, (2003).
- [4] Wang E.R., Hui X.D., Wang S.S., Zhao Y.F., Chen G.L., "Improved mechanical properties in cast Al–Si alloys by combined alloying of Fe and Cu", *Materials Science and Engineering A*, 527: 7878–7884, (2010).
- [5] Lumley R., "Fundamentals of Aluminium Metallurgy, 1st Edition, Production, Processing and Applications", Application of modern aluminium alloys to aircraft , *Woodhead Publishing*, Cambridge, (2010).
- [6] Kori S.A., Prabhudev M.S., "Sliding wear characteristics of Al-7Si-0.3Mg alloy with minor additions of copper at elevated temperature", *Wear*, 271: 680–688, (2011).
- [7] Chen M., Perry T., Alpas A.T., "Ultra-mild wear in eutectic Al–Si alloys", *Wear*, 263: 552–561, (2007).
- [8] Voort G.F.V., "Metallographic Techniques for Aluminum and Its Alloys ", *ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures, ASM International*, Materials Park, USA, (2004).
- [9] Samuel E., Samuel A. M., Doty H. W., Valtierra S. and Samuel F. H., "Intermetallic phases in Al–Si based cast

- alloys: new perspective”, *International Journal of Cast Metals Research*, 27: 107-114, (2014).
- [10] Lee S., Kim, B., Lee S., "Prediction of Solidification Paths in Al-Si-Fe Ternary System and Experimental Verification: Part I. Fe-Containing Hypoeutectic Al-Si Alloys", *Materials Transactions*, 52: 1053-1062, (2011).
- [11] Sivarupan T., Taylor J. A., and Caceres C. H., "Alloy Composition and Dendrite Arm Spacing in Al-Si-Cu-Mg-Fe Alloys", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44: 4071-4080, (2013).
- [12] Chen W.C., Wu C.T., Bor H.Y., and Lee S. L., "Effects of Cu Content on Thermal Stability and Wear Behavior of Al-12.5Si-1.0Mg Alloy”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22: 3854–3859, (2013).
- [13] Kun X.I.E., Mei-qing C.A.O., Peng-cheng X.I.A., Li-jie Y.U.E., "Improving wear resistance of magnesium by droplet spraying of Al-Si alloy”, *Journal of Central South University*, 20: 1781–1785, (2013).

Deformation and Electrical Behaviours of Functionally Graded Piezoelectric Curved Sensors

Eray ARSLAN

Department of Mechanical Engineering, Inonu University, Malatya, Turkey

(Received :03.05.2016 ; Accepted : 17.06.2016)

ABSTRACT

A comprehensive analytical model is developed for a functionally graded piezoelectric (FGP) curved bar which is in a closed electrical circuit. Piezoelectric coefficient is assumed to vary in the radial direction according to a power law unlike the corresponding studies in the literature. This assumption constitutes one of the basic novelties of the present investigation. For the verification, the numerical results of the mathematical model for an FGP curved actuator are compared with those of a related study on a linear FGP curved bar in the literature. Next, the model is used to determine the deformation and electrical behaviours of an FGP curved sensor under a couple at its free end section. The presentation of the numerical results for the curved sensors is another novelty of the present study since the numerical results in the related studies in the literature were presented just for the actuators. Results are compared with bimorph piezoelectric curved sensors and the effect of the grading parameter on the mechanical and electrical fields is examined. Numerical results show that FGP curved sensor provides several advantages in terms of the mechanical behavior of the material, and the distribution and production of electric potential in the sensor are affected significantly with the variation of grading parameter.

Keywords: Piezoelectric materials, functionally graded curved sensor and actuator, analytical model, bending moment.

ÖZ

Kapalı elektrik çevrimi içerisinde bulunan fonksiyonel derecelendirilmiş piezoelektrik (FDP) eğri eksenli giriş için kapsamlı bir analitik model geliştirilmiştir. Literatürdeki ilgili çalışmaların aksine, piezoelektrik sabitinin radyal doğrultuda bir güç yasasına bağlı olarak değiştiği kabul edilmiştir. Bu kabul, çalışmanın temel orijinalitesinden birini oluşturmaktadır. FDP eğri eksenli bir eyleyici için modelin sayısal sonuçları, literatürdeki ilgili çalışmalar ile karşılaştırılarak, modelin sınanması sağlanmıştır. Ardından, model serbest ucundan eğilme momentine mağruz bırakılan FDP eğri eksenli sensörün mekanik ve elektrik alanını elde etmek için kullanılmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalarda sadece eyleyiciler için sonuçlar sunulduğundan dolayı, sensör için sayısal sonuçların sunumu bu çalışmanın bir diğer orijinalliğini temsil etmektedir. Sonuçlar iki tabakalı (bimorph) piezoelektrik eğri eksenli sensör sonuçları ile karşılaştırılmış ve derecelendirme parametresinin mekanik ve elektrik alanındaki etkileri incelenmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, FDP eğri eksenli sensör, malzemenin mekanik davranışları açısından bir çok avantaj sergilemektedir. Elektrik potansiyelinin dağılımı ve üretimi ise derecelendirme parametresine bağlı olarak önemli ölçüde etkilenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Piezoelektrik malzeme, fonksiyonel derecelendirilmiş eğri eksenli sensör ve eyleyici, analitik model, eğilme momenti.

1. INTRODUCTION

Piezoelectric materials are found frequently in many smart structures such as actuators and sensors to realize conversions between mechanical and electrical fields [1-3]. Generating electric potential in a piezoelectric material which works under a mechanical load is known as reversible "sensor" behavior (direct effect). On the other hand, piezoelectric material is called as an "actuator" when an initial electric potential, which causes displacement, is applied onto the structure (converse effect) [1]. In general, the material may be set on a flat [4-6] or circular bar or panel [3,7-11] depending of the purpose of its use. At this point, the geometry of the piezoelectric sensor and/or actuator should be selected according to the shape of the surface on which it is settled. When a flat piezoelectric material is bonded onto structures with complex curved shapes, its sensitivity decreases [4,12]. In these cases, curved sensors or actuators have more advantages than flat piezoelectric

materials, particularly in providing precise information at a test point [13,14]. Moreover, totally different deformation and electrical behaviors are exhibited by flat and curved materials under the same type of loading. For example, there is no stress component in a linearly graded flat actuator subjected to an external electrical load [15], whereas some non-zero stress components emerge in a curved actuator under the same loading condition [16]. Hence, detailed researches must be examined to determine the behaviors of the piezoelectric curved sensors and actuators separately [16].

There are several studies in which mechanical and electrical behaviors of unimorph [17,18], bimorph [19-22], and multimorph [23-26] flat sensors and actuators have been investigated. In these investigations, it is considered that the actuators are subjected to an electric field while the sensors are under harmonic excitations, static shear force, axial force or bending moment. Moreover, mathematical models to define the mechanical behavior have also been developed for functionally graded piezoelectric (FGP) flat sensors [27-30] and actuators [15,31-35]. Indeed, the general use of a

*Corresponding Author

e-mail: eray.arслан@inonu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 531-535

Functionally Graded Material (FGM) provided several advantages to different fields of engineering in terms of device performance related to strength [36], weight [37], electricity production [32], and so forth [38]. It is recalled that the material properties in a structure with FGM vary continuously, and therefore it should be tailored in order to meet different requirements [37]. In the piezoelectric applications, the functionally graded structures are used to reduce the stress concentration at the interface surfaces which exist in the bimorph and multimorph (even in unimorph [39]) piezoelectric materials while maintaining high bending displacement [32]. In these structures, stress discontinuity can be significantly reduced [31], which improves the reliability of the structures [25]. Hence, as mentioned above, a number of investigations have so far been conducted on FGP with flat sensors and actuators.

Circular curved actuators are considered in some other investigations. Kuang et. al. [40] investigated the effect of parameters on the static response of curved unimorph and bimorph actuators under an input voltage. Zhou et. al. [41] presented an analytical model for a multilayered piezoelectric curved bar subjected to mechanical loads. Dynamic analysis of an FGP curved bar was performed by Su et. al. for different boundary conditions [42]. Analytical models were presented by Shi [16] to demonstrate the bending behavior of bimorph and graded curved piezoelectric actuators. In the study, the researcher assumed that the actuators are poled in the radial direction and they are subjected to electric potential between the inner and outer cylindrical surfaces. In the FGP curved actuator model, it was considered that piezoelectric coefficient varies linearly in the radial direction while other material coefficients are assumed to be constant. Shi and Zhang [33] followed a similar analysis but they assumed that the piezoelectric coefficients vary according to a Taylor series expansion for a curved actuator. The same problem but for a multilayered piezoelectric curved actuator was solved by Zhang and Shi [13]. In the same study, they also derived an exact solution for a FGP curved actuator in which nonlinear distribution of the piezoelectric coefficient is assumed to vary according to second order polynomial. The study conducted by Arslan and Usta [43] can be taken as an example of an analysis on the behavior of a piezoelectric curved sensor. In the study, the researchers presented a mathematical model based on the theory of elasticity and is developed for a piezoelectric bimorph curved sensor subjected to pure bending. To sum up, in the literature, there are several studies in which exact solutions are presented for FGP actuators but not for a sensor. There is no previously reported study in the literature on an adequate analytical solution for an FGP curved sensor under mechanical loads. Hence, the aim of the present work is to investigate the mechanical and electrical behaviors of such a curved sensor subjected to a couple, which provides pure bending conditions. At this point, the novelty of the present investigation can be listed as follows:

- More comprehensive analytical model than the related studies in the literature [13,33] is presented,
- Piezoelectric coefficient is assumed to vary in the radial direction according to a power law unlike the corresponding studies in the literature [13,16,33],
- Numerical results are presented not only for the curved actuators but also for the sensors.

In this study, in other words, a general analytical model (which is more comprehensive than Shi's linear one [16]) for a nonlinearly FGP curved bar is developed. Moreover, numerical results for a nonlinearly FGP curved sensor under a mechanical load are presented. It is assumed that the piezoelectric coefficient varies in radial direction nonlinearly according to a power law but other mechanical and electrical coefficients remain constant in the whole bar. The basic assumptions and equations are based on theory of elasticity for a cylindrical coordinate system. They are used to derive the analytical expressions for the stresses, displacements and electric potential [36, 43-45]. The model is first solved for an FGP actuator in which a closed circuit voltage is subjected to its outer cylindrical surface and the numerical responses are compared with those of Shi's linear FGP model [16] after selecting the appropriate grading parameter. Then, the mechanical and electrical fields of an FGP curved sensor subjected to a couple at its free end section are obtained by using the model. The effects of the grading parameter on displacements, stresses, and electric potential are presented and advantages of FGP sensor (over bimorph one [43]) are discussed.

2. BASIC EQUATIONS

The geometry of the functionally graded piezoelectric curved bar which is in a closed electrical circuit [20] (and the coordinate system used) is presented in Fig 1. The direction of the polarization (in the radial direction r) is also shown with an arrow in Fig. 1 [46]. The bar is subjected to a couple M at the end where $\theta = 0$ (and for $r_{in} \leq r \leq r_{out}$) and it is fixed at the other end ($\theta = \pi/2$). A state of plane stress (axial stress component σ_z vanishes) and small deformations are presumed. Assumption of the cylindrical symmetry is considered. Hence, only the components of displacement in radial u and circumferential v directions are functions of both radial coordinate r and the circumferential coordinate θ . However, the other quantities are only a function of r . Moreover, the such assumption provides that the shear stress $\tau_{r\theta}$, the shear strain $\gamma_{r\theta}$, the circumferential component of electric displacement vector D_θ , and circumferential electric field E_θ vanish.

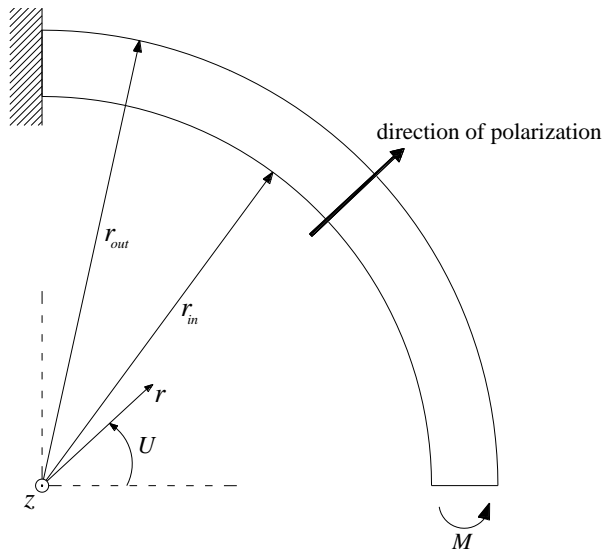


Figure 1. Piezoelectric FGP curved bar.

Taking a variable piezoelectric coefficient $g_{31} = g_{31}(r)$, the governing constitutive equations read

$$\varepsilon_{\theta} = S_{11}\sigma_{\theta} + S_{13}\sigma_r + g_{31}(r)D_r, \quad (1)$$

$$\varepsilon_r = S_{13}\sigma_{\theta} + S_{33}\sigma_r + g_{33}D_r, \quad (2)$$

$$E_r = -g_{31}(r)\sigma_{\theta} - g_{33}\sigma_r + \zeta_{33}D_r \quad (3)$$

where ε_i denote strains, σ_i -stresses, D_r -radial electric displacement vector, S_{ij} -the components of the effective elastic compliance, $g_{31}(r)$ and g_{33} -the piezoelectric coefficients (Type-g), and ζ_{33} - the dielectric permittivity coefficient. Here it is noted that the piezoelectric coefficient $g_{31}(r)$ is assumed to vary in the radial direction according to a power law [37]

$$g_{31}(r) = A\left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n + B \quad (4)$$

where n is the grading parameter of the material, A and B are constants, and r_{in} is the inner surface radius of the bar (see Fig. 1). While this material property depends on the radial coordinate, other material coefficients (i.e. S_{11} , S_{13} , S_{33} , g_{33} , ζ_{33}) are however assumed to be constant in the whole bar since the dependence of g_{31} on the degree of polling is higher than those of the remaining coefficients [28]. The strain-displacement relations are

$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}, \quad (6)$$

$$\gamma_{r\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} = 0. \quad (7)$$

The relationship between electric potential ϕ and radial electric field E_r provides

$$E_r = -\frac{d\phi}{dr}. \quad (8)$$

The compatibility equation is

$$\frac{d^2\varepsilon_{\theta}}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d\varepsilon_{\theta}}{dr} - \frac{1}{r} \frac{d\varepsilon_r}{dr} = 0. \quad (9)$$

Integration of the compatibility relation (9) by parts gives [45]

$$\frac{d}{dr}(r\varepsilon_{\theta}) - \varepsilon_r = C_2 \quad (10)$$

where C_2 is an arbitrary integration constant. The equations of equilibrium for the principle stresses (in the absence of body force) and electric displacement vectors (for no body charge) read

$$\frac{d(r\sigma_r)}{dr} - \sigma_{\theta} = 0, \quad (11)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr}(rD_r) = 0. \quad (12)$$

3. GOVERNING EQUATIONS

Solution of Eq. (12) simply is

$$D_r = \frac{C_1}{r} \quad (13)$$

where C_1 is a constant of integration. Using Eq. (11) and substituting Eqs. (1), (2), and (13) into Eq. (10) yield a differential equation for the radial stress

$$r^2 S_{11} \frac{d^2\sigma_r}{dr^2} + 3r S_{11} \frac{d\sigma_r}{dr} + (S_{11} - S_{33})\sigma_r = C_1 \left[\frac{g_{33}}{r} - \frac{An\left(\frac{r}{r_{in}}\right)^{-1+n}}{r_{in}} \right] + C_2, \quad (14)$$

with the solution

$$\sigma_r = -\frac{C_1}{r} \left[\frac{An\left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n}{n^2 S_{11} - S_{33}} + \frac{g_{33}}{S_{33}} \right] + \frac{C_2}{S_{11} - S_{33}} + C_3 r^{-1-S} + C_4 r^{-1+S} \quad (15)$$

where C_3 and C_4 are new integration constants and

$$S = \sqrt{\frac{S_{33}}{S_{11}}}. \quad (16)$$

From Eq. (11), one obtains for the circumferential stress component the expression

$$\sigma_{\theta} = -\frac{AC_1 n^2 \left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n}{r(n^2 S_{11} - S_{33})} + \frac{C_2}{S_{11} - S_{33}} - C_3 S r^{-1-S} + C_4 S r^{-1+S}. \quad (17)$$

Eqs. (8), (13), (15), and (17) are inserted in Eq. (3) and then solved:

$$\begin{aligned} \phi(r) = & -C_1 \left\{ \frac{A\left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n \left\{ 2g_{33} + n \left[2B + A\left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n \right] \right\}}{2(n^2 S_{11} - S_{33})} + \right. \\ & \left. \frac{(g_{33}^2 + S_{33}\zeta_{33}) \ln r}{S_{33}} \right\} + \frac{C_2 r \left[(1+n)(B + g_{33}) + A\left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n \right]}{(1+n)(S_{11} - S_{33})} - \\ & \frac{C_3 r^{-S}}{S} \left\{ g_{33} - S \left[B - \frac{A\left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n S}{n-S} \right] \right\} + \frac{C_4 r^S}{S} \left\{ g_{33} + S \left[B + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{A\left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n S}{n+S} \right] \right\} + C_5. \quad (18) \end{aligned}$$

Here, a new integration constant C_5 is introduced. To determine radial and circumferential displacement components, the formulation in [44] has been followed.

If the expressions above is substituted into Eq. (5) and integrated for r , following equation is obtained

$$u(r, \theta) = -\frac{C_1 A \left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n (n S_{13} + S_{33})}{n^2 S_{11} - S_{33}} + \frac{C_2 r (S_{13} + S_{33})}{S_{11} - S_{33}} + \frac{C_3 r^{-S} (S S_{13} - S_{33})}{S} + \frac{C_4 r^S (S S_{13} + S_{33})}{S} + f_1(\theta) \tag{19}$$

where f_1 is a function of circumferential direction θ , only. On the other hand, Eq. (6) can be expressed as

$$\frac{\partial v}{\partial \theta} = \varepsilon_{\theta} r - u. \tag{20}$$

Substituting Eqs. (1) and (19) into Eq. (20) and integrating it for θ give

$$v(r, \theta) = \left[C_1 \left(B - \frac{g_{33} S_{13}}{S_{33}} \right) + C_2 r - \frac{r^{-S} (C_3 - C_4 r^{2S}) (S^2 S_{11} - S_{33})}{S} \right] \theta - \int f_1 d\theta + f_2 \tag{21}$$

where f_2 is only function of r . Then, f_1 and f_2 can be found by the substitution of Eqs. (19) and (21) in (7)

$$f_1 = \frac{C_1 (B S_{33} - g_{33} S_{13})}{S_{33}} + D_2 \cos \theta + D_3 \sin \theta, \tag{22}$$

$$f_2 = r D_1. \tag{23}$$

Here, D_1 , D_2 , and D_3 are constants of integrations. Therefrom,

$$u(r, \theta) = C_1 \left(B - \frac{g_{33} S_{13}}{S_{33}} - \frac{A \left(\frac{r}{r_{in}}\right)^n (n S_{13} + S_{33})}{n^2 S_{11} - S_{33}} \right) + \frac{C_2 r (S_{13} + S_{33})}{S_{11} - S_{33}} + \frac{C_3 r^{-S} (S S_{13} - S_{33})}{S} + \frac{C_4 r^S (S S_{13} + S_{33})}{S} + D_2 \cos \theta + D_3 \sin \theta, \tag{24}$$

$$v(r, \theta) = (D_1 + C_2 \theta) r - D_2 \sin \theta + D_3 \cos \theta. \tag{25}$$

A remark must however be made on the above formulae. They cannot be applied for $n = 0$, for $n = -1$, or $n = S = \sqrt{S_{33}/S_{11}}$ since they create singularity in the equations (see, e.g., Eq. (18)). Nevertheless, $n = 0$ is not a meaningful value for a grading parameter in piezoelectric materials from an engineering point of view since piezoelectric structures are mostly produced with a combination of minimum two materials or layers (even a unimorph material consists of piezoelectric and elastic layers [39,40]). Hence, this value stays out of the consideration in the present study. On the other hand, the case of $n = -1$ and $n = S$ can be approximated with arbitrary accuracy by choosing some n close to -1 (e.g. -1 ± 10^{-5}) and to S (e.g. $S \pm 10^{-5}$) in the numerical calculations, and hence this mathematically singular case is not discussed separately.

It should be also noted that $g_{31}(r)$ should be equal to g_{31i} at the inner surface ($r = r_{in}$) and g_{31o} at the outer surface ($r = r_{out}$) of the bar (see Fig. 1). Then, the constants of A and B in Eq. (4) are determined as

$$A = \frac{g_{31i} - g_{31o}}{1 - \left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)^n}, \tag{26}$$

$$B = g_{31i} - \frac{g_{31i} - g_{31o}}{1 - \left(\frac{r_{out}}{r_{in}}\right)^n}. \tag{27}$$

4. SOLUTION FOR AN FGP CURVED SENSOR

For a numerical solution of the FGP curved sensor under couple M (as illustrated in Fig. 1), 8 unknown constants (i.e. C_i and D_j where $i = 1 - 5$; $j = 1 - 3$) should be calculated by using following mechanical and electrical boundary conditions:

$$\phi|_{r=r_{in}} = 0, \tag{28}$$

$$\phi|_{r=r_{out}} = 0, \tag{29}$$

$$\sigma_r|_{r=r_{in}} = 0, \tag{30}$$

$$\sigma_r|_{r=r_{out}} = 0, \tag{31}$$

$$u|_{r=\frac{r_{in}+r_{out}}{2}, \theta=\frac{\pi}{2}} = 0, \tag{32}$$

$$v|_{r=\frac{r_{in}+r_{out}}{2}, \theta=\frac{\pi}{2}} = 0, \tag{33}$$

$$\frac{\partial u}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 0, \tag{34}$$

$$\int_{r_{in}}^{r_{out}} \sigma_{\theta} r dr = -M. \tag{35}$$

It should be noted that numerical methods are performed to calculate the unknown constants.

5. NUMERICAL RESULTS

Firstly, the numerical results for an FGP curved actuator (considering $m = 1$ in Eq. (4)) are compared with the results of Shi's linear FGP actuator model [16] for the verification of the present analytical model. In the illustrations, response variables for the bimorph model of ref. [43] are also presented to provide a general comparison between bimorph and linear FGP actuators. Then the results of the present model for an FGP curved sensor are illustrated to determine the influence of grading parameter n . In all numerical results, the inner and outer surface radii are taken $r_{in} = 16 \text{ mm}$ and $r_{out} = 17.32 \text{ mm}$, respectively, (see Fig. 1) owing to compliance with Shi's [16] and Arslan and Usta's results [43]. In the results, mechanical and electrical coefficients of PZT-4 are used. To provide grading material properties, piezoelectric coefficient g_{31} of the inner surface is taken $g_{31i} = -12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{C}$ and that of the outer surface is $g_{31o} = 12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{C}$. The variation of this constant in the radial coordinate r (for $r_{in} \leq r \leq r_{out}$) for different grading parameters m are presented in Fig. 2. To plot these curves, Eqs. (4), (26), and (27) are used. It should be noted that if $m = 1$, a linear distribution of the coefficient is realized. Moreover, the sign of the parameter m provides the concavity and convexity of the function.

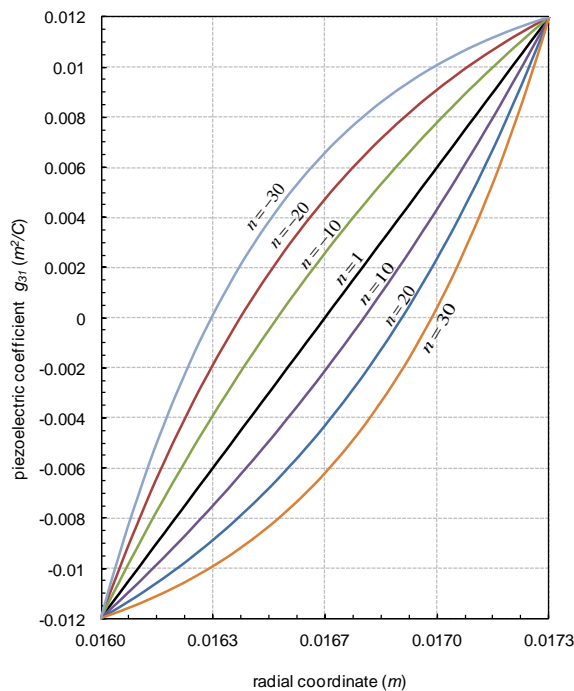


Figure 2. Distribution of piezoelectric coefficient g_{31} in the bar for different grading parameter n .

The other coefficients of PZT-4 material are assumed to be constant in the whole structure as discussed before. For this treatment, the elastic coefficients are taken as $S_{11} = 1.082 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{N}$, $S_{13} = -2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$, $S_{33} = 8.28 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$ remaining piezoelectric coefficient is $g_{33} = 2.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{C}$, and dielectric coefficient becomes $\zeta_{33} = 86.92 \times 10^6 \text{ m/F}$ [47].

5.1. Verification of the Model

For the verification of the present model, it is solved for an FGP actuator by considering the linear variation of piezoelectric coefficient g_{31} in radial direction (then $n = 1$ in Eq. (4)). Then, the results and those of linear FGP model in [16] are compared. To obtain response variables for a curved actuator in the present solution, the boundary conditions (29) and (35) should be changed with

$$\phi|_{r=r_{out}} = V_0, \quad (36)$$

$$\int_{r_{in}}^{r_{out}} \sigma_{\theta} r dr = 0, \quad (37)$$

while the other mechanical and electrical conditions (i.e., Eq. (28), Eqs. (30)-(34)) remain the same. Here V_0 is an initial electric potential applied to the structure. Now, the linear FGP curved bar is an actuator, not a sensor just because of this boundary condition. The comparison of the response variables for the present model and those for Shi's linear one [16] are presented in Fig. 3. For $V_0 = 100 \text{ V}$, the change of radial and circumferential stresses in radial direction and the displacements (at $r = (r_{in} + r_{out})/2 = 16.66 \text{ mm}$) in tangential direction are presented in Figs. 3a-3c, respectively. Furthermore, effect of the increasing electric potential V_0 (for $0 \leq V_0 \leq 100 \text{ V}$) on the radial and circumferential displacements

(at $r = 16.66 \text{ mm}$ and $\theta = 0$) is shown in Fig. 3d. In these figures, while solid lines represent the responses of the present model, dots belong to those of Shi's model [16]. As one can see, the comparisons show that the present solution agrees perfectly with that of ref. [16]. In these figures, it is also possible to see the responses for a curved bimorph actuator [43] (dashed lines) to compare FGP and bimorph actuator behaviors under the same electrical load. In the bimorph actuator, the material properties of the inner and outer layers are the same as those of inner and outer surfaces in FGP ($n = 1$) curved actuator.

5.2. Results for an FGP Curved Sensor

The piezoelectric bar may behave as a sensor and the production of the electricity is provided, if the couple M is applied to the free end of structure (see Fig. 1). The effect of the grading parameter n on the radial stress, circumferential stress, displacements (radial and circumferential components at $\theta = 0$) and electric potential are examined. To do so, n is considered in the range of $-30 \leq n < 0$ and $0 < n \leq 30$. Results show that the change of grading parameter n does not cause significant differences in stresses and displacements for different n values. The main reason behind this is that the piezoelectric coefficient is just assumed to vary in the radial direction in a grading manner but the elastic coefficients are constant through the bar in the present study. To show the effect of the grading parameter n on the elastic response of the bar, couple M is adjusted to 10 Nm and grading parameter n is chosen as -30 . The results are presented in Figs. 4a-4c for a curved sensor with the dimensions given above. Furthermore, the response variables of a bimorph curved sensor [43] are also presented with dashed lines for comparison. It is noted that inner and outer layer properties of the bimorph structure and the inner and outer surfaces of graded one are the same. As one can see in the figures, the distributions of stresses and displacements are not too different in graded and bimorph materials. Furthermore, it should be emphasized that the maximum radial stress that occurs in the FGP sensor is higher than the bimorph one [43] (see Fig. 4a and Fig. 5a). However, the distribution of the circumferential stress is continuous in FGP but it is discontinuous in the bimorph one at the middle radius (Fig. 4b) since it corresponds to interface radius between the two layers in the bimorph. This situation brings a big advantage to FGP sensor concerning to the failure of the structure. Because, the circumferential stress component in a such sensor is nearly 50 times higher than radial stress. The circumferential component is then dominant one and it is more critical to state the failure of a brittle material such as a ceramic if the maximum principle stress criterion is taken into considered [48]. Moreover, less radial and circumferential displacements take place in the FGP curved sensor with $n = -30$ as seen in Fig. 4c. These results prove the advantage of the grading sensor as far as mechanical behavior is concerned. The influence of different n values is more pronounced in the distribution

of electric potential as one can see in Fig. 4d. This figure presents the changes of electric potentials in the radial coordinate for different n values, i.e. -30 , 1 and 30 , as well as for the bimorph sensor [43] under $M = 10 \text{ Nm}$. Even though linear FGP ($n = 1$) and bimorph piezoelectric sensors produce similar electrical potential in the structure, they are significantly different in FGP sensors with $n = 30$ and $n = -30$.

Moreover, to determine effect of grading parameter n on the stresses, displacements and electric potential as well as the change in their maximum values (and also minimum value of electric potential) with different grading parameter n are plotted in Fig. 5. It is noted that $n = 0$ is considered out of the range of the parameters because of the reason discussed in Section 3. In the figures, the corresponding variables for bimorph sensor

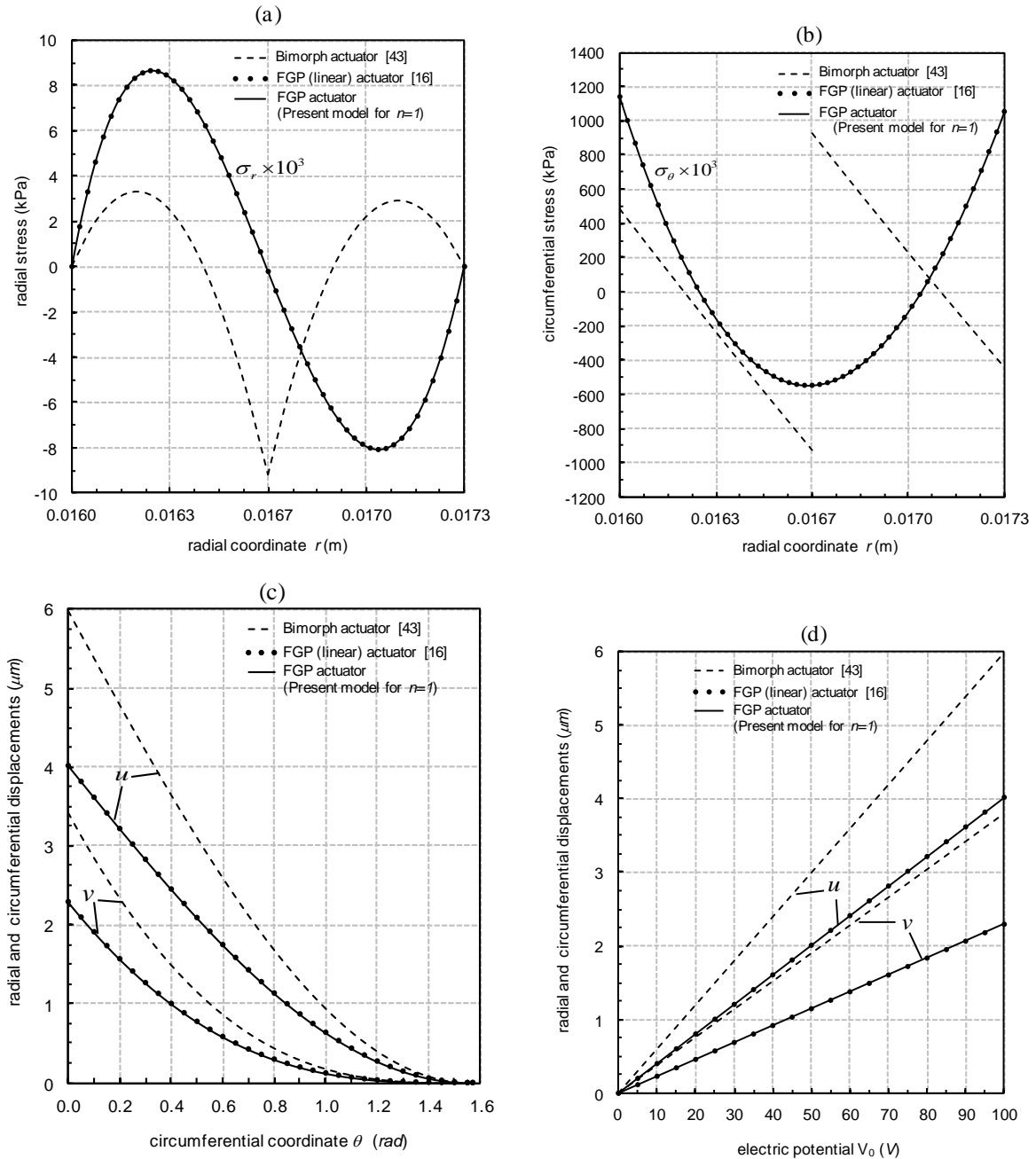


Figure 3. Comparison of the response variables in the curved actuators (for $V_0 = 100 \text{ V}$) obtained from the present FGP model ($n = 1$), FGP (linear) model [16], and bimorph model [43].

are also marked with a dot. These figures also prove the discussions presented above. It should be also noted that in the FGP sensor (for any n values) maximum radial stress occurs at nearly $r = (r_{in} + r_{out})/2 = 16.66 \text{ mm}$, Max. circumferential stress and the radial displacement

appear at $r = r_{in} = 16 \text{ mm}$ while Max. circumferential displacement occurs at $r = r_{out} = 17.32 \text{ mm}$. On the other hand the location of the maximum (and minimum) electric potential values vary in the structure depending on the grading parameter n (see also for Fig. 4d).

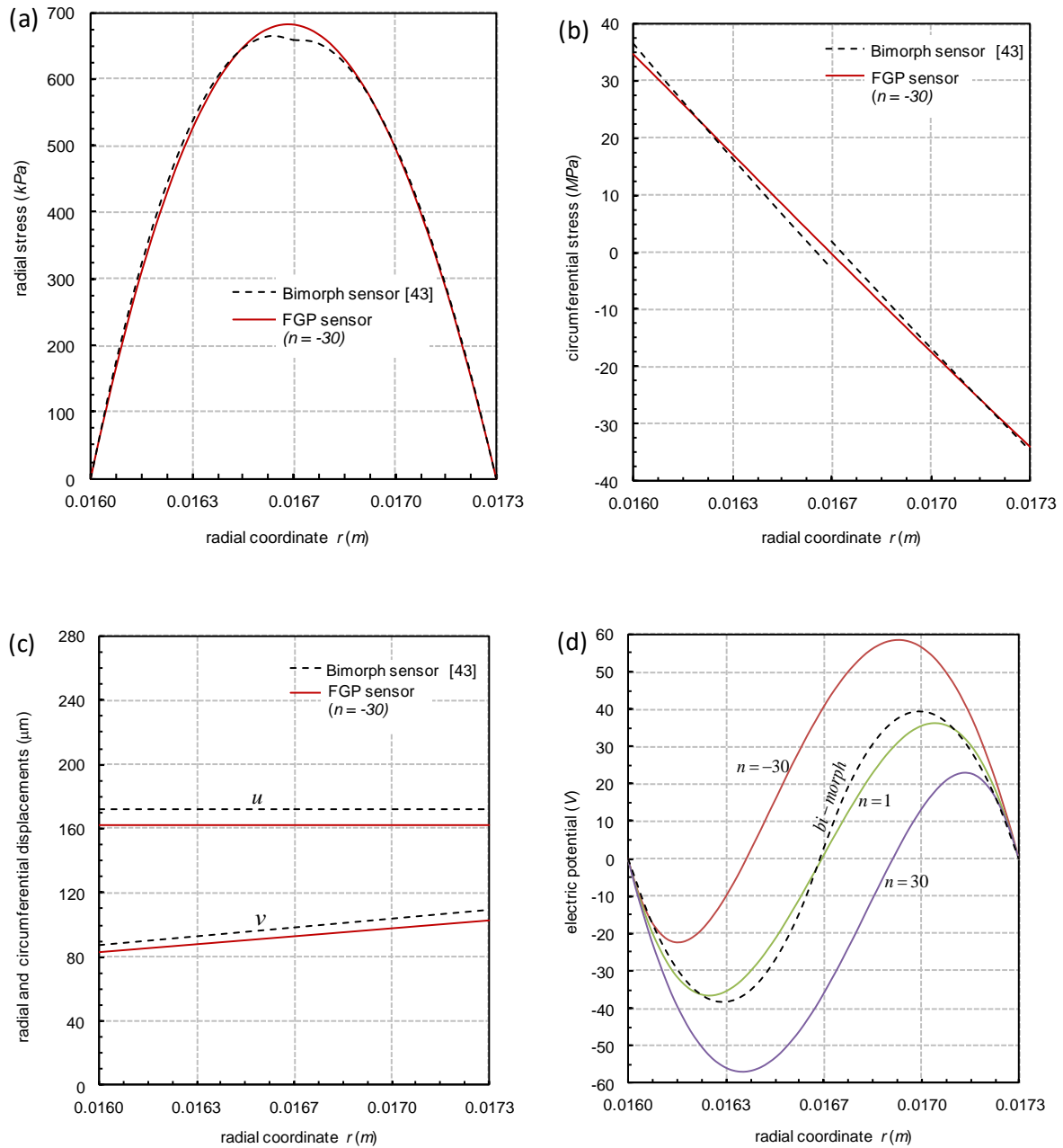


Figure 4. Comparison of the response variables in the curved sensors (for $M = 10 \text{ Nm}$) obtained from the present FGP model and bimorph model [43].

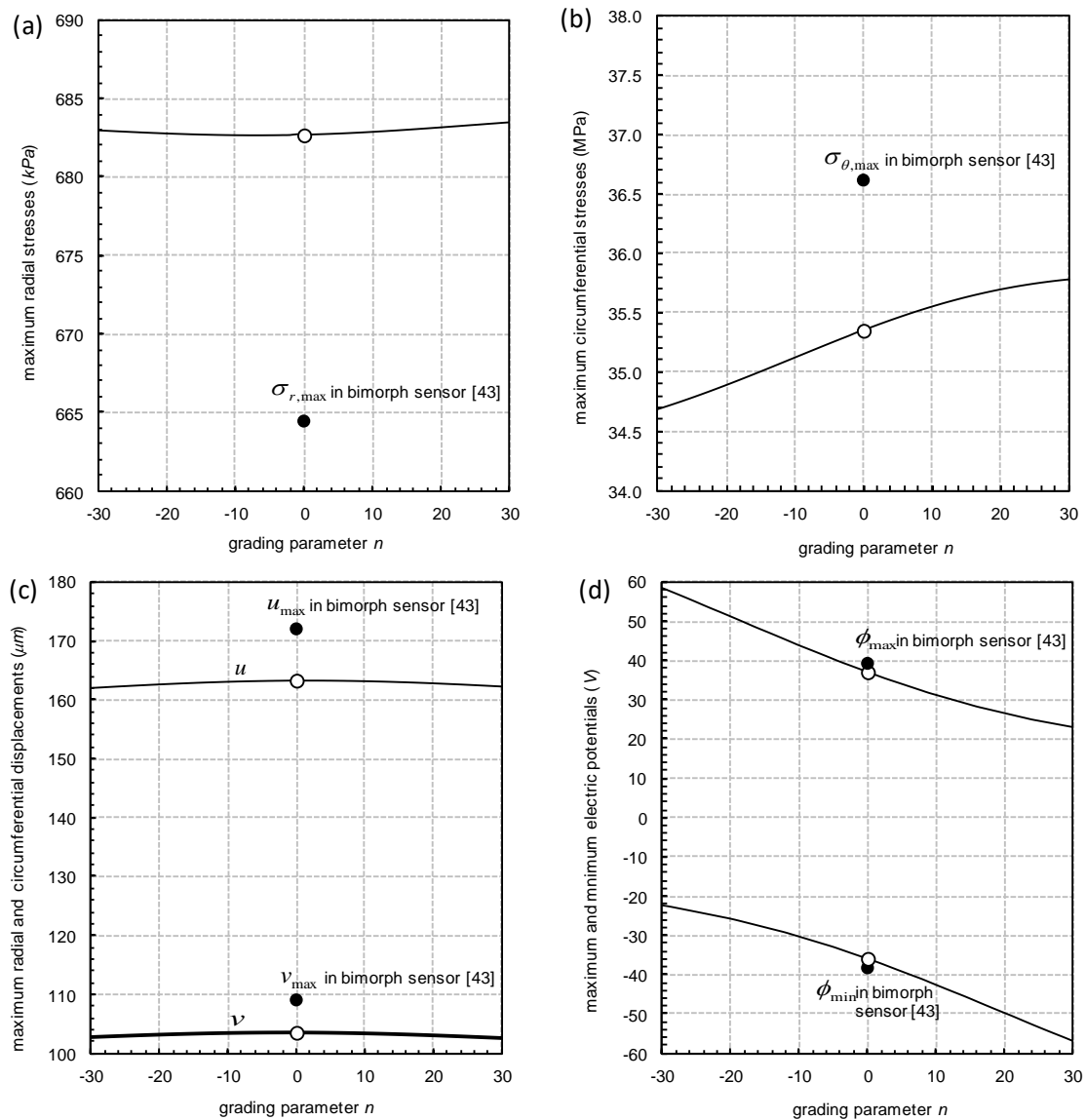


Figure 5. Maximum (and minimum) values of the response variables in the FGP sensor with different grading parameters n and for the bimorph sensor [43].

6. CONCLUDING REMARKS

A comprehensive mathematical model is developed for a functionally graded piezoelectric (FGP) curved bar being in a closed electrical circuit. It is assumed that piezoelectric coefficient varies in the radial direction according to a nonlinear power law while other material coefficients are assumed to be constant throughout the structure. First, by adjusting the boundary conditions, it is provided that the bar behaves as an actuator, and the reliability of the model is verified by comparing the results with those obtained from linear FGP model [16] in the literature. Then, the boundary conditions are adjusted to obtain stresses, displacements, and electric potential in an FGP curved sensor under a couple, and numerical results are presented.

The influence of the grading parameter on the mechanical and electrical fields is examined and the results are

compared with bimorph piezoelectric curved sensors [43]. The results show that the FGP curved sensor has several advantages in terms of the mechanical behavior of the material even though the elastic coefficients are assumed to remain constant in the structure. A continuous distribution of the circumferential stress which is a critical component concerning the failure of the structure are obtained for any grading parameters while distribution of this component is discontinuous on the interface in the bimorph. Moreover, the displacements in the FGP curved sensor are lower than those in the bimorph. Hence, it is considered that FGP curved sensor has more strength than bimorph one due to the fracture and mechanical failure. Effects of the grading parameter also play a considerable role on the distribution and the production of electric potential in the FGP sensor. As the grading parameter is changed, the coordinate and magnitude of the maximum electric

potential produced in the sensor also alter significantly. Therefore, producers and users need to define suitable grading parameters and choose the location of the electrodes in accordance with the application requirements. The present model may be used to observe mechanical and electrical behaviors of any curved actuators and sensors with different dimensions and grading parameters. Hence, the model may serve as a basis for sensor and actuator producers who are interested in piezoelectric materials bonded to structures with curved surfaces.

REFERENCES

1. Tadigadapa S. and Mateti K., "Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives", *Measurement Science and Technology*, 20: 092001, (2009)
2. Tadigadapa S., "Piezoelectric microelectromechanical systems - challenges and opportunities", *Procedia Engineering*, 5: 468-471, (2010)
3. Sonti V.R. and Jones J.D., "Curved piezoactuator model for active vibration control of cylindrical shells" *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 34: 1034-1040, (1996)
4. Kielczynski P., Pajewski W. and Szaiewski M., "Piezoelectric sensors for investigations of microstructures" *Sensors and Actuators A*, 65: 13-18, (1998)
5. Shen M.H., "Analysis of beams containing piezoelectric sensors and actuators", *Smart Material Structures*, 3: 439-447, (1994)
6. Sirohi J. and Chopra I., "Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 11: 246-257, (2000)
7. Larson P.H. and Vinson J.R., "The use of piezoelectric materials in curved beams and rings Adaptive Structures and Material Systems", *ASME AD*, 35: 277-285, (1993).
8. Sun D. and Tong L., "Modeling and analysis of curved beams with debonded piezoelectric sensor/actuator patches", *International Journal of Mechanical Sciences*, 44: 1755-1777, (2002)
9. Ryu D.H. and Wang K.W., "Characterization of surface-bonded piezoelectric actuators on curved beams", *Smart Materials and Structures*, 11: 377-388, (2002)
10. Sayyaadi H., Rahnama F., Farsangi M.A.A., "Energy harvesting via shallow cylindrical and spherical piezoelectric panels using higher order shear deformation theory", *Composite Structures*, 147: 155-167, (2016)
11. Zhai J., Zhao G., Shang L., "Integrated design optimization of structure and vibration control with piezoelectric curved shell actuators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, online first, doi:10.1177/1045389X16641203, (2016)
12. Dai L., Wang Y., "Design and simulation of curved sensors of PVDF for fetal heart rate monitoring", *Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, 129-132, (2015)
13. Zhang T. and Shi Z.F., "Two-dimensional exact analysis for piezoelectric curved actuators", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 1: 640-647, (2006)
14. Shi L., Zhang Y., Dong W., "Research on the relationship between the curvature and the sensitivity of curved PVDF sensor", Proc. SPIE 9446, *Ninth International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation*, 94461Y, doi:10.1117/12.2180862, (2015)
15. Hauke T., Kouvatov A., Steinhausen R., Seifert W., Beige H., Langhammer H.T. and Abicht H.P., "Bending behavior of functionally gradient materials", *Ferroelectrics*, 238: 195-202, (2000)
16. Shi Z.F., "Bending behavior of piezoelectric curved actuator", *Smart Materials and Structures*, 14: 835-842, (2005)
17. Wang Q.M. and Cross L.E., "Performance analysis of piezoelectric cantilever bending actuators", *Ferroelectrics*, 215: 187-213, (1998)
18. Erturk A. and Inman D.J., "An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations", *Smart Materials and Structures*, 18: 1-18, (2009)
19. Smits J.G., Dalke S.I. and Cooney T.K., "The constituent equations of piezoelectric bimorphs", *Sensors and Actuators A*, 28: 41-61, (1991)
20. Brissaud M., "Modelling of non-symmetric piezoelectric bimorphs", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14: 1507-1518, (2004)
21. Brissaud M., Ledren S. and Gonnard P. "Modelling of a cantilever non-symmetric piezoelectric bimorph", *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 13: 832-844, (2003)
22. Shijie Z., Ming C., Zongjun L., Hongtao W., "Size-dependent constituent equations of piezoelectric bimorphs", *Composite Structures*, 150: 1-7, (2016)
23. Xiang H.J., Shi Z.F., "Static analysis for multi-layered piezoelectric cantilevers", *International Journal of Solids and Structures*, 45: 113-128, (2008)
24. Weinberg M.S., "Working equations for piezoelectric actuators and sensors", *Journal of Microelectromechanical Systems*, 8: 529-533, (1999)
25. Shi Z.F., Xiang H.J. and Spencer Jr.B.F., "Exact analysis of multi-layer piezoelectric/composite cantilevers", *Smart Materials and Structures*, 15: 1447-1458, (2006)
26. Vel S.S. and Batra R.C., "Exact solution for the cylindrical bending of laminated plates with embedded piezoelectric shear actuators", *Smart Materials and Structures*, 10: 240-251, (2001)
27. Shi Z.F. and Chen Y., "Functionally graded piezoelectric cantilever beam under load", *Archive of Applied Mechanics*, 74: 237-247, (2004)
28. Yu T. and Zhong Z., "Bending analysis of a functionally graded piezoelectric cantilever beam", *Science in China Series G: Physics, Mechanics & Astronomy*, 50: 97-108, (2007)
29. Chen Y. and Shi Z.F., "Exact Solutions of Functionally Graded Piezothermoelastic Cantilevers and Parameter Identification", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 16: 531-539, (2005)
30. Huang D.J., Ding H.J. and Chen W.Q., "Piezoelectricity solutions for functionally graded piezoelectric beams", *Smart Materials and Structures*, 16: 687-695, (2007)

31. Liu T. and Shi Z.F., "Bending behavior of functionally graded piezoelectric cantilever", *Ferroelectrics*, 308: 43-51, (2004)
32. Taya M., Almajid A.A., Dunn M. and Takahashi H., "Design of bimorph piezo-composite actuators with functionally graded microstructure", *Sensors and Actuators A: Physical*, 107: 248-260, (2003)
33. Shi Z. F. and Zhang T., "Bending analysis of a piezoelectric curved actuator with a generally graded property for the piezoelectric parameter", *Smart Materials and Structures*, 17: 045018, (2008)
34. Li Y.S., Pan E., "Static bending and free vibration of a functionally graded piezoelectric microplate based on the modified couple-stress theory", *International Journal of Engineering Science*, 97: 40-59, (2015)
35. Komijani M., Reddy J.N., Eslami M.R., "Nonlinear analysis of microstructure-dependent functionally graded piezoelectric material actuators", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 63: 214-227, (2014)
36. Arslan E. and Eraslan A.N., "Bending of graded curved bars at elastic limits and beyond", *International Journal of Solids and Structures*, 50: 806-814, (2013)
37. Arslan E. and Mack W., "Shrink fit with solid inclusion and functionally graded hub", *Composite Structures*, 121: 217-224, (2015)
38. Birman V. and Byrd L.W., "Modeling and analysis of functionally graded materials and structures", *Applied Mechanics Reviews*, 60: 195-216, (2007)
39. Anton S.R. and Sodano H.A., "A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003-2006)", *Smart Materials and Structures*, 16: R1-R21, (2007)
40. Kuang Y.D., Li G.Q., Chen C.Y. and Min Q., "The static responses and displacement control of circular curved beams with piezoelectric actuators", *Smart Materials and Structures*, 16: 1016-1024, (2007)
41. Zhou Y., Nyberg T.R., Xiong G., Zhou H., "Precise deflection analysis of laminated piezoelectric curved beam", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, online first, doi:10.1177/1045389X15624797, (2016)
42. Su Z., Jin G., Ye T., "Vibration analysis and transient response of a functionally graded piezoelectric curved beam with general boundary conditions", *Smart Materials and Structures*, 25: 065003, (2016)
43. Arslan E. and Usta R., "Mechanical and electrical fields of piezoelectric curved sensors", *Archives of Mechanics*, 66: 329-342, (2014)
44. Timoshenko S.P. and Goodier J.N., "Theory of Elasticity", *McGraw-Hill*, (1970)
45. Arslan E. and Eraslan A.N., "Analytical solution to the bending of a nonlinearly hardening wide curved bar", *Acta Mechanica*, 210: 71-84, (2010)
46. Kielczynski P. and Pajewski W., "Influence of a layered polarization of piezoelectric ceramics on shear-horizontal surface-wave propagation", *Applied Physics B*, 48: 383-388, (1989)
47. Ruan X., Danforth S.C., Safari A. and Choua T.W., "Saint-Venant end effects in piezoceramic materials", *International Journal of Solids and Structures*, 37: 2625-2637, (2000)
48. Mendelson A., "Plasticity: Theory and Application", *Macmillan*, New York, (1968)

Küresel Lens Temelli Mobil Mikroskop

Kutay İÇÖZ

Abdullah Gül Üniversitesi Elektrik-Elektronik Müh. Kocasinan, Kayseri

(Geliş / Received : 06.02.2016 ; Kabul / Accepted 20.05.2016)

ÖZ

Bu makalede küresel lensin cep telefonu kamerasına takılmasıyla elde edilen ucuz, basit ve taşınabilir mikroskop sunulmaktadır. Sistemin sahip olduğu görüntü kalitesine etki eden özellikleri irdelenmiştir. Küresel lens ile birlikte cep telefonun sahip olduğu lens ve görüntüleme sensörün 100X büyütme, 3,4 mikron çözünürlük ve 1500x1500 µm lik görüş alanı sağlamaktadır. Küresel lens ve tutucunun fiyatı 25 kuruştan ucuzdur. Böyle bir sistemi optik ışık mikroskobu olarak kullanarak, mikro boyutta küresel parçacıkların ve mikro sensörlerin görüntüleri elde edilmiştir. Görüntü işleme metotları ile birleştirildiği takdirde, bu optik sistem, pahalı mikroskopların gerçekleştirdiği komplike işlemleri gerçekleştirebilen alternatif bir metot olabilir.

Anahtar Kelimeler: cep telefonu mikroskop, küresel lens, kontrast-gürültü oranı, çözünürlük

Ball Lens Based Mobile Microscope

ABSTRACT

In this paper we report a low cost, simple and mobile microscope based on attachment of a ball lens to a cell phone. The system's noise and parameters affecting the image quality is investigated. The ball lens provides approximately 100X magnification and together with the cell phone's integrated lens and image sensor, 3,4-micron resolution is reached. The field-of-view of the system is 1500x1500 µm where the price of the ball lens and the holder is less than 10 cents. By using this system as an optical light microscope, we are able to acquire images of micro particles and micro sensors. When combined with image processing methods, this optical system is capable of doing complex analysis as an alternative to commercial optical light microscopes.

Key Words: cellphone microscopy, spherical lens, contrast-to-noise ratio, resolution

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mikro/Nano teknolojideki gelişmeler yeni nesil sensörlerin geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle sağlık alanında geliştirilen sensörlerin yardımıyla laboratuvarlarda sadece uzman personel tarafından gerçekleştirilen pahalı ve zaman alan analizlerin yerine mikro/nano teknoloji tabanlı kullanımı kolay, düşük maliyetli ve yüksek hassasiyette sistemlerin/yöntemlerin geliştirilmesi çalışmaları tüm dünyada ilgi çekmektedir [1]. Hasta başı (Point-of-care) olarak adlandırılan bu sistemlerin bir kısmı ürüne dönüşerek pazar paylarını her geçen gün arttırmaktadır [2], [3]. Benzer algılayıcılar sadece tıp alanında değil, çevre ve gıda alanlarında geliştirilmekte, laboratuvarlara ulaşımı kolay olmayan ve anında analiz gerektiren durumlarda kullanılarak topluma fayda sağlamaları hedeflenmektedir [4].

Ekonomik nedenlerden dolayı gerekli sağlık hizmetlerine ulaşamayan insanların sayısı alternatif metotların geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bunun yanında cep telefonlarının kullanım oranları hızla artmaktadır (Uluslararası Telekomünikasyon Birliği verileri, www.itu.int/en/ITU-D/Statistics). Elektronik sanayisinde her yıl geliştirilen üretim teknikleri ile cep telefonlarının fiyatları düşmekte teknik kapasiteleri

artmaktadır. Cep telefonları ve tabletlerin yaygınlaşması, gelişmiş işlem güçleri ve sahip oldukları sensörler bu cihazları sadece iletişim araçları olmaktan çıkarıp çok amaçlı kullanımlarının önünü açmıştır. Mobil cihazların kameralarında kullanılan görüntüleme sensörlerinin piksel sayıları ve çözünürlükleri her yeni nesil üründe geliştirilmektedir. Cep telefonlarını mikroskoba dönüştürme fikri araştırma guruplarının ilgisini çekmiştir ve bu amaçla çeşitli yöntemler geliştirilmiştir [5]–[8], bu yöntemler çizelge 1'de kısaca özetlenmiştir.

Çizelge 1. Cep telefonlarını mikroskop olarak kullanmak için geliştirilen sistemlerin temel özellikleri (The fundamental features of different systems using cell phone based microscopy)

Yöntem	Temel Özellikler	Kaynak
Lenssiz	- Holografik görüntüleri yazılımlar ile işlemek zorunlu - Cep telefonu lensleri çıkarılıyor	[6], [9]
Küresel Lens	- Düşük maliyetli - Görüntü kalitesinde iyileştirme gerekiyor	[8]
Ayrık Lens	- Fazladan hizalama gerektiriyor - Telefona herhangi bir aparat takılmıyor	[7]
Çoklu Lens	- Hacimli donanım takılması gerekiyor	[5]

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: kutay.icoz@agu.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 603-610

Bu yöntemlerin çeşitli avantajları/dezavantajları mevcuttur ve geliştirilme çalışmaları devam etmektedir. Lenssiz sistemlerde görüntüleme sensörü üzerinde oluşan holografik görüntüler geliştirilen yazılım algoritmaları ile işlenerek kayıtlı referans veriler ile karşılaştırılmakta böylece hücre sayımı yapılabilmektedir [6]. Ayrık Lens sistemlerinde ise telefona herhangi bir aparat takılmadan örnek üzerine yerleştirilen lens görüntüyü telefonun kamerasına iletmekte kullanılmaktadır [7]. Çoklu lens sistemleri ise bir çok lensin bir arada kullanıldığı, hacimli aparatların cep telefonlarına takılması ile oluşturulmaktadır [5]. Küresel lensler çoğunlukla fiber optik kablolarla takılarak kullanılmakla beraber [10] hem cep telefonlarını mikroskoba çevirmede [8] hem de kağıt katlama temelli basit mikroskop yapımında düşük maliyetlerinden dolayı tercih edilmiştir [11].

Bu çalışmada küresel lens ve Samsung Note 4 cep telefonu kullanılarak oluşturulan mikroskobun karakterizasyonu ve mikro boyuttaki demir oksit parçacıklardan ve silisyum nitrattan üretilmiş mikro sensörlerden elde edilen görüntülerin analizleri yer almaktadır. Karakterizasyon çalışmaları kapsamında çözünürlük, kontrast-gürültü oranı hesapları ve görüntüyü etkileyen faktörler incelendi. Çözünürlük görüntüleme sistemlerinin belirlenmesi gereken önemli bir parametredir ve cep telefonunun mikroskop olarak kullanıldığı önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir. Kontrast-gürültü oranı medikal görüntüleme de sıkça kullanılan önemli bir parametre olup algılanmak istenen sinyalin arka plan sinyalinden ayırt edilebilirliğini göstermektedir.

İzleyen bölümlerde sırasıyla oluşturulan görüntüleme sisteminin tanıtımı ve karakterizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen veriler sunulmaktadır. Sonuç kısmında ise genel değerlendirmeler yapıp neticeler ve mümkün olan gelişmeler irdelenmektedir.

2. YÖNTEM (METHODS)

2.1. Görüntüleme Sistemi (Imaging System)

Küresel lensler BioSpec firmasının 11079135 katalog numaralı cam küreleri olup bir tanesinin fiyatı yaklaşık olarak 0.16 TL'dir. Küresel lensleri cep telefonu kamerasına takmak için plexiglass -akrilik malzeme lazer kesici yardımıyla lens çaplarına göre kesilerek lens tutucu olarak kullanıldı. Akriklik malzeme çift taraflı

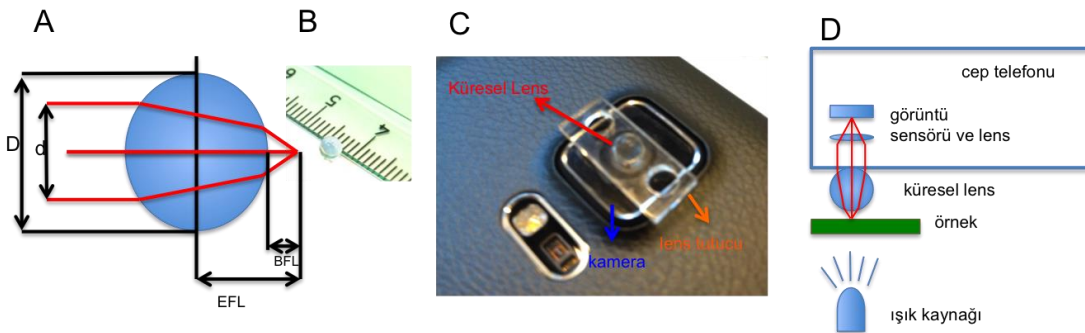
yapışkan bantlar ile cep telefonuna sabitlendi. Bu çalışmada Samsung Note 4 cep telefonu sahip olduğu 16 mega piksel görüntü işleme sensörü nedeniyle tercih edildi. Samsung Note 4 cep telefonunun kamerası 1 piksel boyutu 1.12 μm ve maksimum 5312X2988 çözünürlüğüne sahip Sony IMX240 görüntüleme sensörü ve f/2.2, 35mm odak uzunluğuna sahip lens içermektedir. Oluşturulan görüntüleme sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir.

Küresel lenslerin optik özelliklerini belirten en önemli parametreleri Efektif Odak Uzunluğu (Effective Focal Length -EFL), Arka odak Uzunluğu (Back Focal Length-BFL), Numerik Açıklık (Numerical Aperture-NA) ve Büyütme (Magnification -MAG)'dir. Ortalama $D=3.45$ mm çaplı küresel lensler borosilikat cam malzemeden üretilmiş olup kırılma indisi $n=1.517$ 'dir. Çizelge 2'de küresel lensin temel parametrelerini hesaplamak için kullanılan formüller sunulmuştur (tüm uzunluk değerleri μm 'dir). Hesaplanan değerler çizelge 4'te gösterilmiştir.

Çizelge 2. Küresel lensin parametreleri (Important parameters of ball lens)

Parametre	Formül [11]
Büyütme (MAG)	$MAG = \frac{(5 \times 10^5 \mu\text{m}) \frac{2(n-1)}{nD}}{nD}$ (1)
Efektif Odak Uzunluğu (EFL)	$EFL = \frac{nD}{4(n-1)}$ (2)
Arka Odak Uzunluğu (BFL)	$BFL = EFL - \frac{D}{2}$ (3)
Numerik Açıklık (NA)	$NA = \frac{2d(n-1)}{nD}$ (4)

Cep telefonu + küresel lens ile edilen örneklerden görüntü almak için başka bir cep telefonunun ışığı şekil 1D'de gösterildiği gibi yerleştirildi. Literatürde belirtilen çözünürlük [12] ve kontrast gürültü oranı (Contrast to noise ratio CNR) [13] formülleri (Çizelge 3) kullanılarak kayıt edilen görüntülerin Matlab yardımıyla incelenmesiyle bu parametreler hesaplandı, sonuçlar çizelge 5'te yer almaktadır. Görüntüleme sistemi ile kayıt edilen görüntüde belirlenen profil çizgisi boyunca ışık şiddetinin (Intensity) değişimi Matlab yardımıyla incelendi. Çözünürlük için yarı yükseklikteki değer (full width at half maximum FWHM) eşitlik 5 kullanılarak



Şekil 1. A: Küresel lensin önemli parametreleri, B: Küresel lensin fotoğrafı C: Cep telefonu, lens tutucu ve küresel lensten oluşan görüntüleme sisteminin fotoğrafı, D: Ölçüm düzeneği. (Figure 1: A: The important parameters of a ball lens, B: Image of a ball len, C: The imaging system consists of cellphone, lens holder and ball lens, D: Measurement setup.

hesaplandı. Eşitlik 5'deki Δx_A şiddetin %50'den %100'ye çıktığı mesafe olarak tanımlandı.

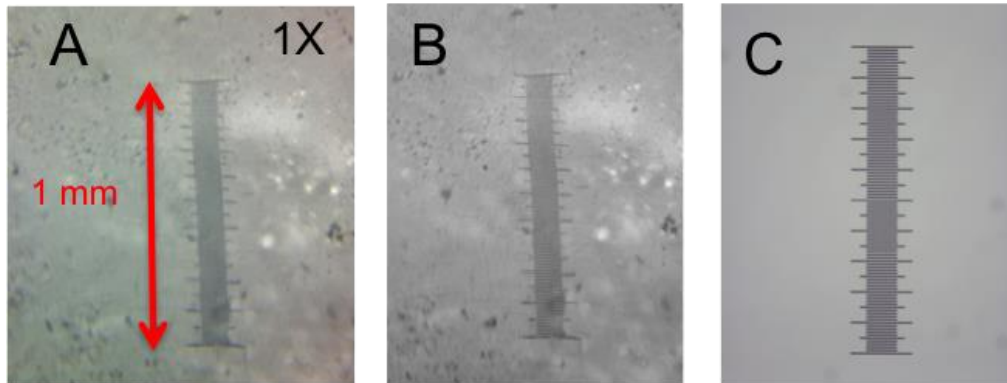
CNR hesaplamak ve Nikon optik ışık mikroskobu ile karşılaştırmak için mikro parçacıklardan elde edilen görüntülerde nesnenin ortalama piksel değeri şiddeti (μ_{object}) ile arka planın ortalama piksel değeri şiddeti ($\mu_{background}$) farkı, ortamın görüntüsündeki piksel değerlerinin şiddetinin standart sapmasına ($\sigma_{background}$) oranı olarak tanımlanan eşitlik 6 kullanıldı. Nesnenin ortalama piksel değeri şiddeti için nesneyi yatay olarak kesen profil çizgilerinin ortalaması alındı, arka plan içinse nesne barındırmayan sadece arka plan olan bölgelerdeki profil çizgileri kullanıldı.

Çizelge 3. Görüntülerden çözünürlük ve kontrast-gürültü oranı hesaplamak için kullanılacak formüller (The formulas to calculate the resolution and contrast-to-noise ratio from the images)

Parametre,Kaynak	Formül
Çözünürlük (δ), [12]	$\delta = (FWHM)_{Gaussian} = \Delta x_A \times 2\sqrt{\ln 2}$ (5)
Kontrast-gürültü oranı (CNR), [13]	$CNR = \frac{ \mu_{object} - \mu_{background} }{\sigma_{background}}$ (6)

2.2. İstatistik Analizi (Statistical Analysis)

15 adet küresel lensin çapı dijital kumpas ile ölçüldü ve ortalama çap 3.45 mm, standart sapma da 0.14 olarak



Şekil 2. 1 mm uzunluğundaki standart mikro cetvelin görüntülenmesi A: Küresel lens + cep telefonundan beyaz ışık kaynağı kullanılarak elde edilen görüntü, B: A'daki görüntünün Matlab yardımıyla gri skalaya dönüştürülmüş hali, C: Nikon marka optik ışık mikroskobu ile elde edilen mikro cetvelin görüntüsü. (Imaging of standard micro ruler of 1mm. A: Image recorded by cellphone+ball lens with white light source, B: Grey scale image of A converted with Matlab, C: Image of mikro ruler with the Nikon optical light microscope.

bulundu. Çözünürlük ve CNR hesapları için 9 profil çizgisinin ortalaması alındı.

2.3. Referans Görüntüleme Sistemi (Reference Imaging System)

Referans görüntüleme sistemi olarak Nikon Ni-U model optik ışık mikroskobu 10X objektifi ve 10X göz merceği ile kullanıldı, bu konfigürasyon 100X optik büyütme sağlamaktadır. Cep telefonun ve küresel lens kullanılarak kayıtlı görüntüler Matlab programı kullanılarak hazırlanan görüntü işleme fonksiyonları ile analiz edildi. Görüntüler üzerinde gösterilen profil çizgisi (profile line) boyunca yer alan piksellerin renk şiddeti değişimi incelendi. Referans standart olarak Nikon firmasının mikroskop kalibrasyonu için ürettiği 1 mm uzunluğunda

ve 0-1 mm arasının 100 eşit aralığa bölündüğü mikro cetvel kullanıldı. Görüntülenen mikro cetvel, mikro parçacıklar ve mikro sensörler Nikon marka optik ışık mikroskobu ile de görüntülenip veriler karşılaştırıldı.

3. BULGULAR (RESULTS)

Çizelge 2'de verilen formüller kullanılarak küresel lenslerin büyütme, efektif odak uzunluğu, arka odak uzunluğu ve numerik açıklığı hesaplandı. Küresel lens üretici firmanın belirttiği 100X büyütme oranına hesaplama ile yaklaşık olarak ulaşıldı.

Çizelge 4. Küresel Lensin hesaplanan parametreleri (The calculated parameters of ball lens)

Parametre	Hesaplanan Değerler
Büyütme (MAG)	98.8
Efektif Odak Uzunluğu (EFL)	2530
Arka Odak Uzunluğu (BFL)	805
Numerik Açıklık (NA)	0.296

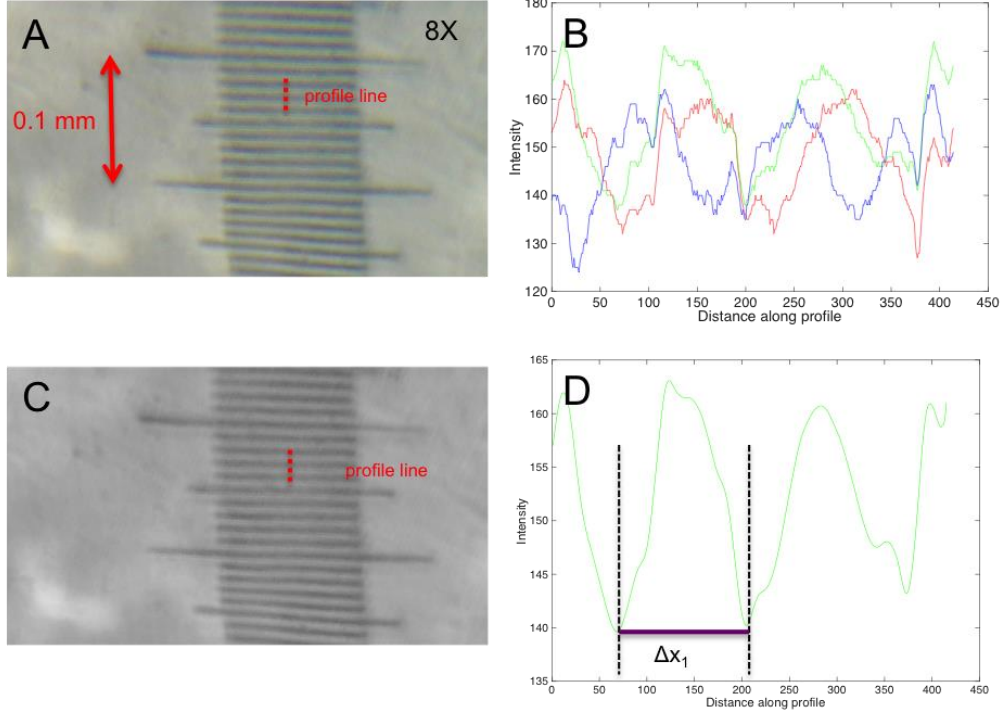
Şekil 2'de mikro cetvelin beyaz ışık aydınlatması ile cep telefonu + küresel lens ile alınan görüntüleri ve Nikon marka optik mikroskobtan alınan görüntüsü yer almaktadır. Cep telefonunun 1X yakınlaştırma özelliği kullanılarak çekilen bu görüntülerde mikro cetvelin dışında geri planın gürültüsü, görüntüdeki bozukluklar da net bir şekilde gözlenmektedir. Nikon optik mikroskop

ile elde edilen görüntünün ise daha net ve çizgilerine ayırt edilebilirliğinin daha yüksek olduğu görülmektedir.

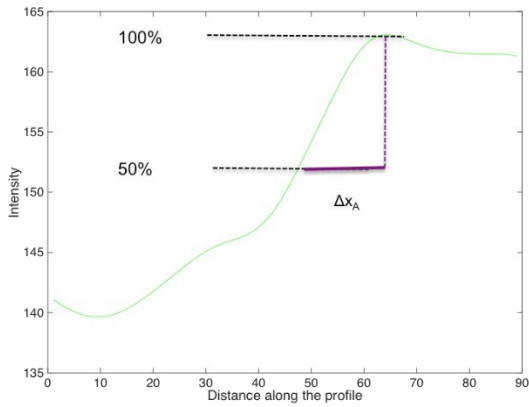
Mikro cetvelin görüntüsü cep telefonun 8X yakınlaştırma özelliği ile kayıtlı edildiğinde Şekil 3A'daki görüntü elde edildi. Elde edilen bu görüntüler Matlab yardımıyla incelendi profil çizgileri boyunca piksel renk değerlerinin şiddetinin değişimi renkli görüntü ve gri skala görüntü için irdelendi (Şekil 3). Şekil 2'deki 1X yakınlaştırma ile kayıtlı görüntüler de çözünürlük hesaplaması için incelendi ve şekil 3'deki görüntülerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı.

Şekil 4'deki grafik, şekil 3D'deki grafiğin bir adet minimum-maksimum tepe noktalarını gösterecek biçimde kesilmesiyle elde edildi. Cep telefonunun

çözünürlüğü hesaplamak için şekil 4’de görülen siyah-beyaz geçişi boyunca piksellerin renk şiddetinin %50 den %100’ye çıktığı mesafe= Δx_A eşitlik 5’te yerine konularak çözünürlük hesaplandı (Çizelge 5).



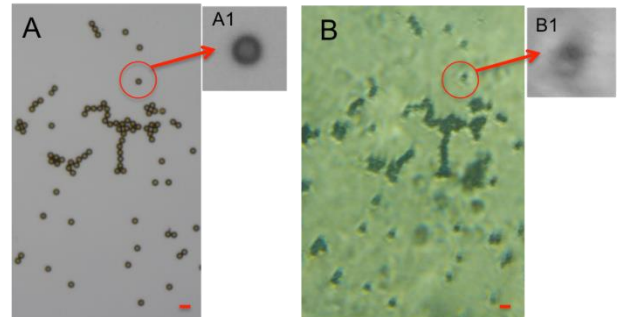
Şekil 3. Çözünürlüğü belirlemek için yapılan ölçümler. A: Cep telefonun 8X büyüme özelliği kullanılarak mikro cetvelden alınan görüntü. B: Profil çizgisi (profile line) boyunca piksellerin renk şiddetinin kırmızı, yeşil ve mavi için değişimi grafiği. C: A’daki görüntünün Matlab’de gri skalaya çevrilmiş hali. D: C’deki görüntüdeki profil çizgisi boyunca piksellerin renk şiddetinin değişimi (yumuşatma fonksiyonu kullanılmıştır). Δx_1 mikro cetvel üzerinde $10 \mu\text{m}$ ’lik mesafeye karşılık gelmektedir. (Measurements for defining the resolution. A: Image recorded by cellphone with 8X zoom B: Red, green, blue intensity change of the pixels along the profile line, C: Grey scale image in A converted with Matlab, D: Intensity change of the pixels along the profile line in C (smooth function is used). Δx_1 corresponds to $10 \mu\text{m}$ on the micro ruler.



Şekil 4. Çözünürlüğü tespit etmek için yapılan ölçümler. Şekil 3B’deki grafikten minimum ve maksimum arası geçiş kısmı incelenerek %100 ile %50 arasındaki mesafe = Δx_A ölçümüştür. Bu değer çözünürlük hesaplamak için kullanılacaktır. (Measurements to determine resolution. From figure 3B minimum to maximum transition is investigated to measure the distance Δx_A between 100% and 50% intensity change.

Cep telefonu+küresel lens düzeneğinin kayıt ettiği görüntülerin gürültülü olduğu ve ayırt ediciliğinin az olduğu şekil 2’de görülmektedir. Çözünürlük hesabı bu düzeneğin karakterizasyonunda tek başına yeterli

olmayıp ayırt ediciliğinin de etkisi irdelenmelidir. Bunun için $8 \mu\text{m}$ çaplı mikro boncuklar mikroskop lamı üzerine konularak görüntüleri hem Nikon mikroskop ile hem de cep telefonu ile kayıt edildi (Şekil 5). Daha sonra bu görüntülerdeki tek bir manyetik parçacık ve arka planı içeren alt görüntü kesilerek Matlab yardımıyla CNR hesaplandı.



Şekil 5. Mikro boyuttadaki boncukların görüntüleri A: Nikon optik ışık mikroskobu ile edilen görüntü. B: Cep telefonu + küresel lens ile edilen görüntü. Ölçek çubuğu $15 \mu\text{m}$. A1 ve B1 alt görüntüleri, CNR hesaplama da kullanılan, A, B görüntülerinden kesilen tek bir mikro parçacığı gösteren gri skala görüntüleridir. (Images of micro beads A:Image recorded by Nikon microscope.

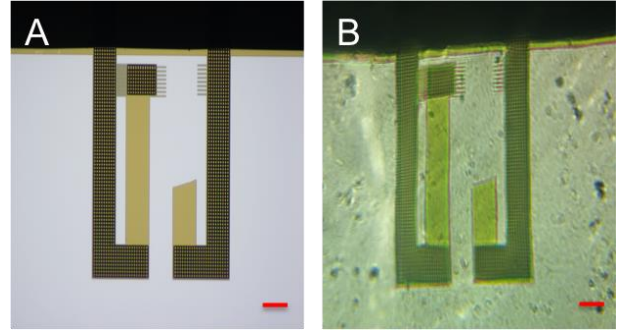
B: Image recorded by cellphone+ball lens system. Scale bar is 15 μm . A1 and B1 grey scale subimages of a single bead are cropped from A and B to calculate CNR.

Çizelge 5. Görüntülerden ölçülen ortalama çözünürlük ve CNR değerleri (Table 5: Resolution and CNR values measured from recorded images)

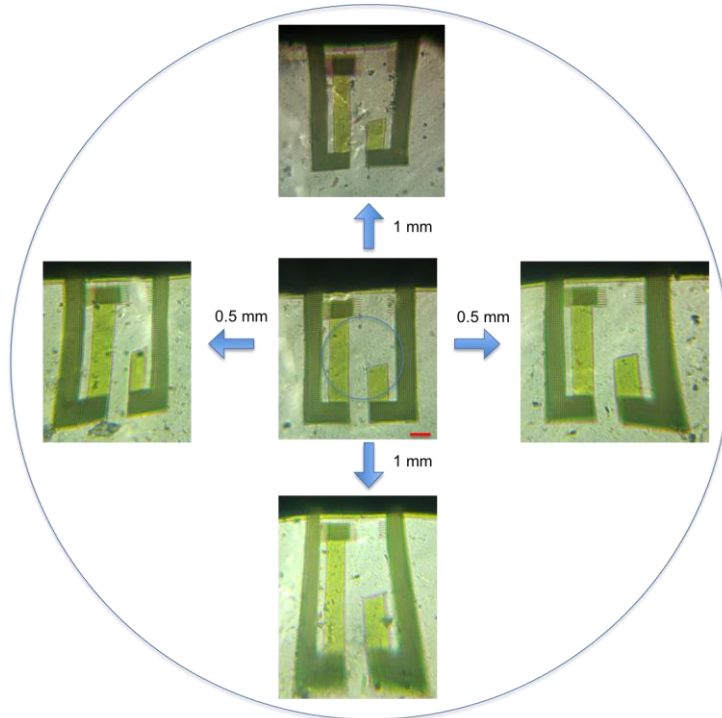
Parametre	Cep telefonu	Nikon Mikroskop
Ortalama Çözünürlük ($\bar{\delta}$) [12]	3,4 μm (SS=0,7)	0,92 μm (SS=0,01)
Ortalama Kontrast-gürültü oranı (\overline{CNR}) [13]	1,63 (SS=0,4)	23,56 (SS=2,1)

Çizelge 3’de verilen formüller elde edilen görüntüye uygulanarak ortalama çözünürlük ve CNR değerleri ile standart sapma (SS) değerleri hesaplandı (Çizelge 5). Kontrast-gürültü oranı (Contrast-to-Noise Ratio CNR) görüntü kalitesini gösteren bir parametre olarak kullanılmaktadır [13] çözünürlük ile beraber değerlendirildiğinde anlamlı çıkarımlar yapmak mümkündür. Bu karakterizasyon çalışmaları göstermektedir ki cep telefonu + küresel lens sisteminde ayırt edicilik düşüktür ve gürültünün etkisi görüntü kalitesini ciddi olarak etkilemektedir.

Bu düzeneklerde görüntü kalitesini etkileyen önemli bir etken de görüntülenecek nesnenin küresel lensin merkez hizasına göre konumudur. Küresel lenslerde örnek kürenin orta noktasından kenarlara doğru hareket ettirildiğinde görüntü bozulmalara uğramaktadır. Bu durumu incelemek için mikro sensör [14] küresel lens ile



Şekil 6. Mikro boyuttaki sensör görüntüleri A: Nikon optik ışık mikroskobu ile edilen görüntü. B: Cep telefonu + küresel lens ile edilen görüntü. Ölçek çubuğu 100 μm . (Figure 6: Images of micro sensor. A: Image recorded by Nikon microscope B: Image recorded by cellphone+ball lens. Scale bar is 100 μm .)



Şekil 7. Mikro boyuttaki sensörün merkezden yatay ve düşey eksen boyunca hareket ettirilmesi ile elde edilen görüntüler. Ölçek çubuğu 100 μm . (Figure 7: Images of micro sensor moved away from the center along the vertical and horizontal axes. Scale bar 100 μm)

görüntülendi ve bozulmalar gözlemlendi (Şekil 6-7).

Şekil 6’ da görüldüğü üzere tam orta noktadan uzaklaştıkça görüntüde bozulmalar başlamaktadır. Merkezden yaklaşık 500 μm uzaklıkta bozulmalar etkin olmaktadır.

Bozulmanın mesafeye göre değişimini daha iyi göstermek için mikro sensör görüntü alanının en uç noktalarına hareket ettirildi (Şekil 7).

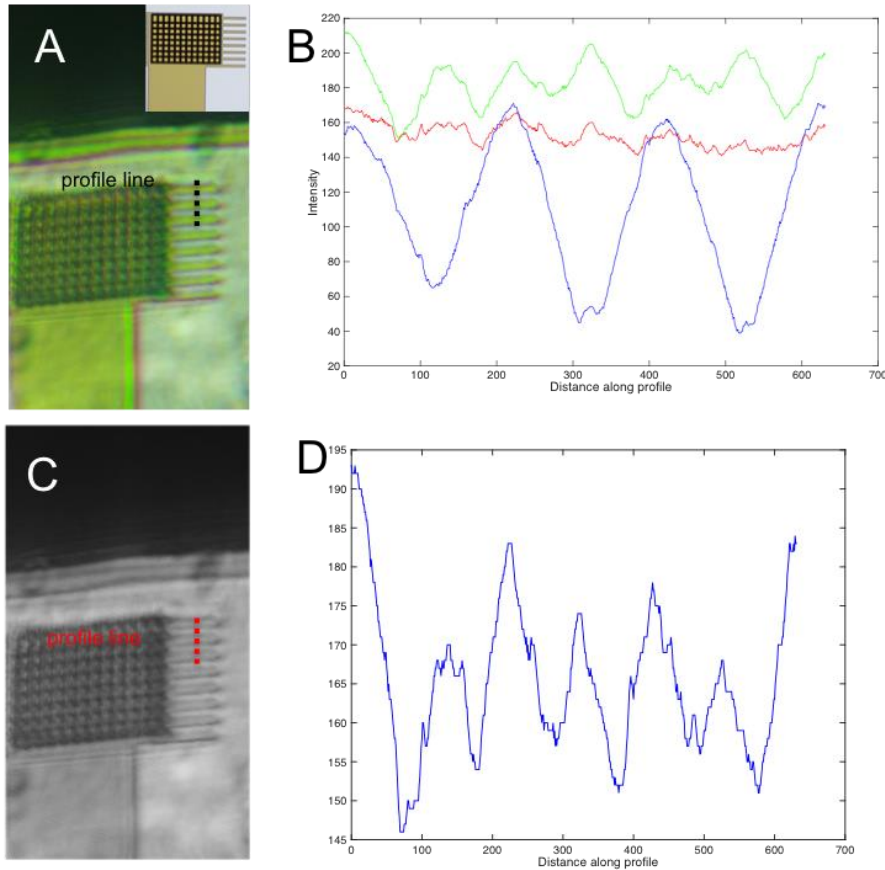
Merkezden yatay ve dikey eksen boyunca hareket ettirilen mikro sensörden alınan görüntüler küresel lensin yapısının neden olduğu bozulmaları net olarak göstermektedir. Sensörün merkezdeki ve uçlardaki boyutları ölçülerek yatay eksende ortalama %33, dikey ekseninde ise %38 oranında boyut değişimi gözlemlendi. Bu dairesel bozulma içbükey bozulmaya benzer bir davranış gösterip merkezden uzaklaştıkça bozulma artmaktadır.

Medikal görüntüleme çalışmalarında renkli görüntüler değil gri skala görüntüler kullanılmaktadır. Renkli elde edilen görüntüler ise gri skalaya çevrilerek geliştirilen teknikler ile incelenmektedir. Bu çevirimin cep telefonu+küresel lens sistemine etkisini incelemek için mikro sensörün 8X büyütme ile görüntüleri kayıt edildi. Hem renkli görüntü de hem de gri skala görüntüde aynı profil çizgisi boyunca renk şiddetinin değişimi incelendi

Şekil 8B ve 8D’de net olarak görüldüğü üzere gri skala profil kırmızı, mavi ve yeşilin ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Şekil 8B’de mavi rengin taşıdığı veri net şekilde mikro sensördeki geometrik değişimi yansıtmaktadır; mikro sensör üzerindeki üç mikro parmak dikey profil ile incelendiğinde mavi renkte üç adet minimum tepe noktasına karşılık gelmektedir. Kırmızı rengin taşıdığı veri gürültü mertebesinde kalmaktadır, yeşil renkte ise parmakların içi maksimum tepelere karşılık gelmektedir. Gri skala değişimi ise üç rengin ortalaması olduğundan daha çok mavi ve yeşil rengin taşıdığı verilerin etkisi görülmektedir. Görüntülenecek nesneye göre renkli analiz yapıldığında gri skalada yapılan analize göre daha fazla veriye ulaşılabileceği sonucuna ulaşılmaktadır.

4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSIONS)

Bu makalede sunulan çalışma ile maliyeti düşük, kullanımı kolay küresel lens düzeneği cep telefonu ile



Şekil 8. A: Mikro sensörün 8X yakınlaştırma ile kayıt edilmiş görüntüsü, köşede Nikon mikroskop ile kayıt edilen görüntü yer almaktadır B: A'daki profil çizgisi boyunca mavi, yeşil ve kırmızı renk şiddetlerinin değişimi. C: A'daki renkli görüntünün gri skalaya çevrilmiş hali D: C'de gösterilen profil çizgisi boyunca gri skala renk şiddetinin değişimi. (Figure 8 A: Images of micro sensor with 8X zoom, corner: image recorded by Nikon microscope B: Intensity change of blue, green and red colors along the profile line. C: Grey scale image of A. D: Intensity change of grey scale along the profile line)

(Şekil 8).

birlikte kullanılarak geliştirilen mobil mikroskop incelendi. Geliştirilen sistemin teknik özellikleri yapılan ölçümler ile belirlenmiş olup, mikro parçacıklardan ve

mikro sensörlerden görüntüler alınarak sistemin potansiyeli gösterildi. Görüntülenen mikro parçacıklar ve mikro sensörler tıbbi ölçümler yapmak için farklı birçok uygulamada kullanılmaktadır [15], [16] ve cep telefonu+küresel lens ile görüntülenebilmeleri ile yeni nesil mobil ve ucuz algılama sistemlerinin geliştirilmesi mümkün olabilecektir.

Bu çalışmada kullanılan cep telefonu piyasadaki en yüksek özelliklere sahip olmasa da diğer modeller içerisinde üst seviye bir telefondur. Cep telefonlarının yıllara göre gelişmeleri dikkate alındığında yakın bir gelecekte 16 MP kameranın orta ve alt seviye cep telefonlarında kullanılacağı öngörülmektedir. Böylece bu çalışmada gerçekleştirilen görüntüleme sisteminin cep telefonundan kaynaklı fiyatı çok daha uygun hale gelecektir. Gelişmiş kameraların yaygınlaşması ile daha kaliteli görüntü elde etmek kolaylaşacaktır.

Küresel lensler ile kayıt edilen görüntülerde netliği bozan gürültüler mevcuttur. Bunların bir nedeni kullanılan küresel lenslerin standart bir kalitesinin olmamasıdır. Ayrıca beyaz ışık kaynağı olarak başka bir cep telefonun ışığı kullanılmıştır, bu metot kolay uygulanabilir olmasına rağmen ışık kaynağı da optimize edilerek daha iyi sonuçlar alınabilir.

Yapılan ölçümler ve analizler göstermiştir ki küresel lensin çözünürlüğü düşük maliyetli bir sistem için yeterli seviyede olmasına rağmen gürültüler ve bozulmalar elde edilen görüntülerin kalitesini etkileyebilmektedir. Eğer cep telefonu + küresel lens sistemi ile çeşitli sayısal analizler yapılacak ise gürültüler ve küresel bozulmalar geliştirilecek görüntü işleme teknikleri ile giderilmelidir, görüntü işleme ile görüntülerin iyileştirilebileceği bu tip sistemler için literatürde gösterilmiştir [8]. Ayrıca daha standart ve kaliteli küresel lenslerin kullanılması ile elde edilecek görüntülerin kalitesi arttırılabilir. Safirden yapılan ve daha küçük çaplı lensler ile daha yüksek çözünürlükler elde etmek mümkündür [11]. Bu çalışmadan ulaşılan 3.4 µm çözünürlük küçük ve safir lensler kullanılarak 0.8 µm seviyesine düşürülebilir.

Görüntü işleme teknikleri cep telefonun üzerinde çalışacak uygulamalar şeklinde gerçekleştirilebilir. Ayrıca örneklerin yerleştirildiği lam üzerinde yer alacak standart referans işaretler de görüntülerin işlenmesini ve sayısal analizlerin yapılmasını kolaylaştırabilir. Bu tür sistemler için CNR değerinin kullanılması bu çalışma ile gösterilmiştir ki gereklidir ve anlamlı veriler vermektedir.

Ayrıca bu çalışmada görüntülenen nesnenin yapısına bağlı olarak renkli görüntülerin analiz için kullanılması ve üç rengin değişimi incelenerek sadece gri skala görüntünün analiz edilmesinden daha fazla sonuca ulaşabileceği gözlemlendi.

Küresel lens ve lens tutucunun maliyeti çeyrek kuruştan az olup 100X büyütme ve cep telefonu kamerası ile 3.4 µm çözünürlük sağlamaktadır. Ayırt ediciliğin sistemin performansına olan etkisi CNR'ın incelenmesi ile ortaya çıkarılmıştır.

Bu çalışmada küresel lens ile gerçekleştirilen görüntüleme sistemi, çizelge 1'de yer verilen lenssiz [6], ayırık lens [7]

ve çoklu lens [5] sistemlerinin hepsine göre maliyeti en düşük ve gerçekleştirilmesi en kolay olanıdır. Lenssiz sistemler için cep telefonlarının üzerlerindeki lenslerinin çıkarılması, ayırık lens ve çoklu lens içinse hizalama veya hacimli donanımların takılması gibi fazladan işlemlerin yapılması gerekmektedir.

Önemli maliyet ve yapım avantajı olmasına rağmen, küresel lenslerin kullanıldığı sistemlerin gürültü performansı geliştirilmelidir. Bu çalışmada yapılan ölçümler göstermiştir ki CNR değeri, mobil görüntüleme sistemlerinin tasarımında ve karakterizasyonunda önemli performans parametresi olarak kullanılabilir ve CNR değerinin iyileştirilmesiyle görüntü kalitesi artırılabilir.

Bu tip sistemler için CNR iyileştirme konusundaki çalışmalar gelecek araştırma hedeflerimiz arasında yer almaktadır.

Geliştirilecek sistemlerin şehir dışında, kırsal alanlarda, kaynakların limitli olduğu bölgelerde mikroskop ihtiyacına karşılık araştırma ve eğitim amaçlı kullanımı mümkündür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu proje Abdullah Gül Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri, AGU BAP (2015-11) kodlu proje ile finansal olarak desteklenmiştir. Dr. İsa Yıldırım, ve Dr. İbrahim Özdür'e konuyla ilgili yaptıkları fikir teatisinden dolayı, Dr. Çağrı Savran'a mikro sensor temininden dolayı teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] P. Rolfe, "Micro- and Nanosensors for Medical and Biological Measurement," *Sensors Mater.*, 24(6): 275–302, (2012).
- [2] A. S. S. Vasani, R. Doraiswami, D. M. Mahadeo, Y. Huang, and M. Pecht, "Point-of-Care Biosensor Systems," *Front Biosci*, 1(5): 39–71, (2013).
- [3] S. A. Soper, K. Brown, A. Ellington, B. Frazier, G. Garcia-Manero, V. Gau, S. I. Gutman, D. F. Hayes, B. Korte, J. L. Landers, D. Larson, F. Ligler, A. Majumdar, M. Mascini, D. Nolte, Z. Rosenzweig, J. Wang, and D. Wilson, "Point-of-care biosensor systems for cancer diagnostics/prognostics," in *Biosensors and Bioelectronics*, 21(10): 1932–1942, (2006).
- [4] S. Neethirajan and D. S. Jayas, "Nanotechnology for the Food and Bioprocessing Industries," *Food and Bioprocess Technology*, 4(1): 39–47, (2011).
- [5] D. N. Breslauer, R. N. Maamari, N. A. Switz, W. A. Lam, and D. A. Fletcher, "Mobile phone based clinical microscopy for global health applications," *PLoS One*, 4(7): (2009).
- [6] S. Seo, T.-W. Su, D. K. Tseng, A. Erlinger, and A. Ozcan, "Lensfree holographic imaging for on-chip cytometry and diagnostics," *Lab Chip*, 9(6): 777–787, (2009).
- [7] A. Arpa, G. Wetzstein, D. Lanman, and R. Raskar, "Single lens off-chip cellphone microscopy," in *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*, 23–28, (2012).
- [8] Z. J. Smith, K. Chu, A. R. Espenson, M. Rahimzadeh, A. Gryshuk, M. Molinaro, D. M. Dwyre, S. Lane, D. Matthews, and S. Wachsmann-Hogiu, "Cell-phone-based platform for biomedical device development and education applications," *PLoS One*, 6(3): (2011).
- [9] D. Tseng, O. Mudanyali, C. Oztoprak, S. O. Isikman, I.

- Sencan, O. Yaglidere, and A. Ozcan, "Lensfree microscopy on a cellphone.," *Lab Chip*, 10(14): 1787–92, (2010).
- [10] R. a Schwarz, D. Arifler, S. K. Chang, I. Pavlova, I. a Hussain, V. Mack, B. Knight, R. Richards-Kortum, and A. M. Gillenwater, "Ball lens coupled fiber-optic probe for depth-resolved spectroscopy of epithelial tissue.," *Opt. Lett.*, 30(10): 1159–1161, (2005).
- [11] J. S. Cybulski, J. Clements, and M. Prakash, "Foldscope: Origami-based paper microscope," *PLoS One*, 9(6): (2014).
- [12] A. G. Athanassiadis, P. J. La Riviere, E. Sidky, C. Pelizzari, X. Pan, and H. M. Jaeger, "X-ray tomography system to investigate granular materials during mechanical loading," *Review of Scientific Instruments*, 85(8): 83708–83709, (2014).
- [13] T. Gomi, "Dual-Energy Subtraction X-Ray Digital Tomosynthesis: Basic Physical Evaluation," *Open J. Med. Imaging*, 2: 111–117, (2012).
- [14] C. A. Savran, A. W. Sparks, J. Sihler, J. Li, W. C. Wu, D. E. Berlin, T. P. Burg, J. Fritz, M. A. Schmidt, and S. R. Manalis, "Fabrication and characterization of a micromechanical sensor for differential detection of nanoscale motions," *J. Microelectromechanical Syst.*, 11(6): 703–708,(2002).
- [15] J. Lee, K. Icoz, A. Roberts, A. D. Ellington, and C. a Savran, "Diffractometric detection of proteins using microbead-based rolling circle amplification.," *Anal. Chem.*, 82(1): 197–202, (2010).
- [16] K. Icoz and C. Savran, "Nanomechanical biosensing with immunomagnetic separationNo Title," *Appl. Phys. Lett.*, 97(2): 123701, (2010).

Toz Metalürjisi ile Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Ni İlavesinin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi

Mehmet Akif ERDEN, Muhammed Taha TAŞCI

Karabük Üniversitesi TOBB TB MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, KARABÜK

Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Müh. A.B.D., KARABÜK

(Geliş / Received : 07.06.2016 ; Kabul / Accepted : 11.07.2016)

ÖZ

Bu çalışmada % ağırlıkça % 0,55 grafit ve % 0,15 (Nb-V) içeren demir esaslı malzemelerde Ni ilavesinin (% ağırlıkça 2, 3 ve 5) mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmıştır. 750 MPa basınçta preslenen numuneler 1350°C de argon atmosferinde 1 saat sinterlenerek üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen TM çeliklerinin mikroyapısı optik mikroskop SEM ve EDS ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar % ağırlık olarak 5 Ni ilave edilmiş TM çeliğin en yüksek akma dayanımına (A. D.) ve çekme dayanımına (Ç. D.) sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Toz metalürjisi; toz metalürjisi çelikleri; Ni; mikroyapı; mekanik özellikler.

The Effect of Ni on the Microstructure and Mechanical Properties of Nb-V Microalloyed Steels Produced by Powder Metallurgy

ABSTRACT

In this work, the effect of Ni (wt. % 2-3-5) on the microstructures and tensile behaviours of Fe matrix materials including graphite 0.55 wt. % and (Nb-V) 0.15 wt. % were investigated. The samples pressed at 750 MPa were produced by sintered at 1350°C temperature in the argon atmosphere for 1 h. The microstructure of the produced PM steels was characterised by optic microscope, SEM and EDS. Results indicated that 5 wt. % Ni added PM steel showed the highest values in yield strength (YS) and ultimate tensile strength (UTS).

Keywords: Powder metallurgy; powder metallurgy steels; Ni; microstructure, mechanical properties.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

İnsan ihtiyaçlarının gelişen teknoloji ile beraber artış göstermesi malzeme alanında yapılan çalışmaların önemini artırmaktadır. Bu çalışmalar arasında metal matrisli malzeme üretiminde önemli bir yer almaktadır. Metal matrisli malzemeler birden daha fazla sayıda, kimyasal bileşimi ve özellikleri bakımından farklı olan malzemenin birleştirilmesi ile bir araya getirilen ve matris malzemesi Fe, Al gibi metal malzemelerden oluşan malzemeler olarak tanımlanabilirler [1-2].—Bu malzemelerin üretim yöntemlerinden bir tanesi de toz metalürjisi üretim yöntemidir.

Birçok kaynakta genel olarak toz metalürjisi, imalatı zor parçaların yüksek mukavemet ve minimum toleransla üretimi için seramik esaslı tozlar ile saf metal ve alaşım tozların karıştırılarak preslenmesi, sinterlenmesi şeklinde tanımlanmaktadır [3-7]. Kısaca toz metalürjisi tozların bazı işlemlerden geçirilerek yararlı mühendislik malzemelerine dönüştürülmesidir [7]. Bu yöntem, üretilebilirlik, ekonomiklik, homojenlik gibi üstün özellikleri

sağladığı için tercih edilmektedir. Üretim maliyetinin düşük olması ve performansının yüksek olması sebebiyle birçok farklı alanda kullanılmaktadır [7].

Döküm yoluyla üretilmeyen yüksek ergime sıcaklığına sahip seramikler, bakırlı çelikler ve karışık fazlı bileşimler, refrakter malzemeler, birbiri içerisinde çözünmeyen tozlar, intermetalikler, sermetler gibi döküm yöntemiyle üretimi zor olan malzemeler toz metalürjisi yoluyla üretilebilir. Bu teknikte üretilen malzemeler, ortopedi malzemeleri, nükleer güç santralleri, yüksek sıcaklığa dayanıklı filtreler, uçak parçaları, otomobil parçaları, elektrik bağlantı elemanları, saat parçaları, gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen malzemelerin yüzey kalitesi çok iyi ve boyutları tamdır. Ayrıca toz metalürjisi ile üretilen malzemelere yüksek oranda ikinci faz partikülleri katılabilir [8-9]. Yapılan birçok çalışma, demir matrisli malzeme üretimine örnek olarak verilebilir. Örneğin, Wang et al., yaptıkları çalışmada (Ti, V)C ile güçlendirilmiş Fe matrisli kompozitler (Ti, Fe, Fe-% 50 V, Fe-%70 Cr, Fe-%50 Mo) üretmişlerdir. (Ti,V)C partiküllerin Fe matrisin içerisinde homojen dağıldığı ve küçük taneli olduğu görülmüştür. Ayrıca

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta: makiferden@karabuk.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 611-616

yazarlar V/Ti atomik oranının artmasıyla (Ti, V)C'ün kafes parametresinin düştüğü ve morfolojisinin ise düzensiz şekilden küresel şekle dönüştüğünü tespit etmişlerdir [10]. Günümüzde üretilen çeliklerin büyük bölümü yassı ve boru mamul olarak üretilmekle birlikte son yıllarda dövme amaçlı çeliklerin üretimi de hız kazanmıştır. Ayrıca günümüzde yeterli düzeyde olmamakla birlikte toz metalürjisi yöntemiyle de çelik üretimi yapılmaktadır [5;7;12].

Nikel östenit dengeleyicidir ve demir krom karbon alaşımlarında östenit alanını genişletir ve ferrit alanını daraltır. Nikel, yüksek sıcaklıkta korozyon ve oksitlenmeye karşı direnci artırır. Tane küçültme etkisine sahip olan nikel, malzemenin tokluğunu ve mukavemetini artırır. Ayrıca, malzemenin yüzeyinde tufal oluşumunu engelleyici özelliğe sahiptir. Krom ile birlikte kullanılması ile birlikte sertliğini, sünekliliğini yüksek yorulma direncini artırır ve kritik soğuma hızını düşürür. Literatürdeki bazı çalışmalar Ni ilavesinin perlit miktarını artırdığı yönündedir. Örneğin, Kalathur ve Frederick yaptıkları çalışmada Fe-C-Ni alaşımlarında Ni miktarının artması ile kısmen perlitin içindeki karbon miktarının azaldığı ve ayrıca mikroyapıda perlit miktarının arttığı ferrit miktarının ise azaldığını belirtmişlerdir. Bunun sonucunda malzemenin dayanımı artarken sünekliliğin düştüğünü gözlemlemişlerdir [2;11]. Nikel elementi bir çok element ile (karbon, bakır ve molibden gibi) karşılaştırıldığında, sahip olduğu difüzyon katsayısı değeri daha düşük olduğundan demir içerisinde yavaş yayılım gösterir [13, 14]. Bu çalışmada Fe tozlarının içerisinde grafit, Nb, V ve farklı oranlarda Ni ilave edilerek istenilen bileşimde çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen blok numuneler için sinterleme işlemi 1350°C'de 1 saat süre ile argon atmosferinde bekletilerek yapılmıştır. Numunelerin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop, SEM ve EDS ile gerçekleştirilirken, mekanik özellikleri ise çekme testi uygulanarak belirlenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA (EXPERIMENTAL STUDY)

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle Çizelge 1'de verilen kimyasal bileşimlerde çelik numuneler üretilerek Ni miktarının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Numuneler için çekme testi ve mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır. Karıştırma işlemi öncesinde kullanılan grafit, demir, niyobyum, vanadyum ve nikel tozlarının toz boyutları sırasıyla <20, ≤180, <45, <44 ve 5 µm'dir. Saflık değerleri ise sırasıyla yaklaşık olarak %

96,5, % 99,9, %99,8, % 99,5 ve % 99,7'dir. Tozların tartımı Çizelge 1'de kimyasal kompozisyonu verilen oranlarda 0,0001 hassasiyetine sahip dijital hassas terzide gerçekleştirilmiştir. Tartımı yapılan tozlar Turbula marka üç eksenli karıştırıcı ile bir saat süreyle bilyesiz olarak karıştırılmıştır. Yağlayıcı olarak Zn-stearate kullanılmıştır.

Karıştırılan tozlar, ASTM (E 8M) toz metal malzeme standartlarına uygun çekme numunesi şeklindeki kalıpta 750 MPa presleme basıncında tek yönlü sıkıştırılarak blok haline getirilmiştir. Sinterleme işlemi 1350°C'de 1 saat argon atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Sinterlenen çekme numuneleri mekanik özelliklerini tespit etmek için 1 mm/dak. çekme hızında çekme deneyi uygulanarak koparılmıştır. Her deney sonrasında gerilme-% gerinim diyagramları elde edilmiştir. Kimyasal bileşimdeki nikel oranındaki değişimden kaynaklanan mekanik özelliklerdeki farklılıklar numunelerin akma dayanımı (%0,2), çekme dayanımı ve % uzama değerleri tespit edilerek belirlenmiştir. Şekil 2'de çekme numunesinin mekanik özelliklerinin tespit etmek için uygulanan çekme testi sonrası görüntüsü verilmektedir.



Şekil 2. 1350°C'de 1 saat sinterlenmiş Alaşım 2 test numunesinin çekme testi sonrası genel görüntüsü (General view of tensile test specimen for Alloy-2 sintered at 1350 °C for 1 h)

Mikroyapı incelemeleri X50-X1000 büyütme kapasiteli Nikon Epiphot 200 marka optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Her numunenin değişik bölgelerinden farklı büyüklüklerde görüntüler alınarak bu görüntülerin bütün mikroyapıyı temsil edebilir nitelikte olmasına dikkat edilmiştir. Dağlama işlemi numunelerin %2 nital solüsyonu içerisinde daldırılarak 4-8 sn bekletilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi tamamlandıktan sonra dağlanan yüzeyler metanol ile temizlenip kurutulmuş ve ardından optik mikroskopta incelemeye hazır hale getirilmiştir. Numunelerin yoğunlukları yoğunluk ölçüm kiti ile Archimets prensibine göre yapılmıştır. Toz metal çeliklerin perlit oranları Gladman ve Woodhead'ın tanımladığı metalografik nokta sayım metodu kullanılarak yapılmıştır. Optik mikroskop görüntüleri ile elde edilen Alaşım 1 ve Alaşım 2 numunelerin tane boyutları ortalama doğrusal kesişme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

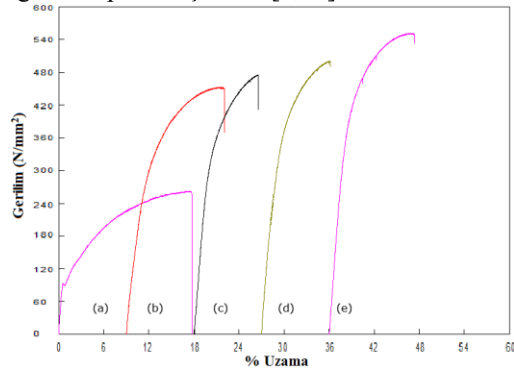
Çizelge 1. Toz metal çeliklerin kimyasal kompozisyonları (Chemical compositions of powder metallurgy steels)

Bileşim	Grafit(% ağı.)	Nb (% ağı.)	V (% ağı.)	Ni(% ağı.)	Fe (% ağı.)
Alaşım 1	0,55	-	-	-	Geri kalan
Alaşım 2	0,55	0,75	0,75	-	Geri kalan
Alaşım 3	0,55	0,75	0,75	2	Geri kalan
Alaşım 4	0,55	0,75	0,75	3	Geri kalan
Alaşım 5	0,55	0,75	0,75	5	Geri kalan

3. DENEY SONUÇLAR VE TARTIŞILMASI (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)

Şekil 3 sinterlenen numunelerin gerilme-uzama diyagramlarını gösterirken, Çizelge 2 ise akma, çekme ve % uzama değerlerini göstermektedir. Şekil 3 ve Çizelge 2 mekanik özellikler yönünden karşılaştırıldığında Alaşım 1 ve Alaşım 2 de grafit oranları sabit tutulup Nb ve V etkisi incelenmiştir. Alaşım 1'e Nb ve V ilave edilmesiyle elde edilen Alaşım 2'nin mekanik özelliklerinin Alaşım 1'e göre belirgin bir şekilde üstün olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak ilave edilen Nb ve V elementi sinterleme sırasında ve sonrasında oluşturduğu çökeltiler ile çökelti serleşmesi ve tane boyutu küçültme gibi mukavemet artırıcı mekanizmalar sayesinde akma ve çekme dayanımını artırmıştır. Benzer çalışmalar bu sonucu desteklemektedir. Örneğin Erden vd. yaptıkları çalışmalarda TM yöntemiyle Ti ve V mikroalaşımli çelik üretmişlerdir. Sinterleme işlemini 1150°C'de 60 dakika bekleterek gerçekleştirmiş olup Ti ve V oranı (% 0,1- % 0,2) yükseldikçe akma ve çekme dayanımında bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durumu sinterleme sırasında ve sinterleme sonrası soğuma sırasında TiC(N) ve VC(N) gibi çökeltilerin oluşmasına bağlamışlardır [7;12]. Alaşım 2, Alaşım 3, Alaşım 4 ve Alaşım 5 de grafit, Nb ve V oranları sabit tutulup Ni etkisi incelenmiştir. Ayrıca üretilen çekme numunelerinde çekme testi sonrası elde edilen değerler karşılaştırıldığında nikel oranının artması ile akma ve çekme dayanımı artış gösterirken, % uzama değerlerinde bir düşüş tespit edilmiştir. Örneğin Alaşım 2'de çekme dayanımı 454 MPa ve % uzama değeri % 13 iken Alaşım 4'de çekme dayanımı 502 MPa ve % uzama değeri % 9 çıkmıştır. Çıkan sonuçlar literatürle uyumluluk göstermektedir. Örneğin, Kalathur and Frederick yaptıkları çalışmada Fe-C-Ni alaşımlarında Ni miktarının artması ile kısmen perlitin içindeki karbon miktarının azaldığı ve ayrıca mikroyapıda perlit miktarının arttığı ferrit miktarının ise azaldığını belirtmişlerdir. Bunun sonucu olarak malzemenin dayanımı artarken sünekliğin düştüğünü tespit etmişlerdir [2;11].



Şekil 2. Farklı nikel oranlarına sahip numunelerin gerilme-uzama diyagramları, (a) Alaşım 1, (b) Alaşım 2, (c) Alaşım 3, (d) Alaşım 4 ve (e) Alaşım 5. (Stress-strain curves of specimens with different Ni contents (a) Alloy 1, (b) Alloy 2, (c) Alloy 3, (d) Alloy 4, and (e) Alloy 5.)

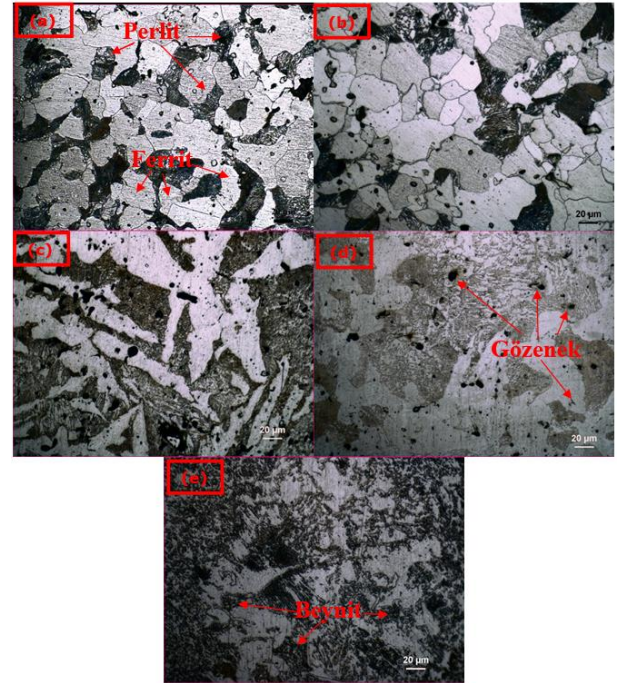
Çizelge 2. Mikroalaşımli TM çelik numunelerin mekanik özellikleri (Mechanical properties of microalloyed PM steels)

Bileşim	Akma D. (MPa)	Çekme D. (MPa)	% Uzama
Alaşım 1	92	263	17
Alaşım 2	250	454	13
Alaşım 3	267	476	9
Alaşım 4	289	502	9
Alaşım 5	313	554	10

Bu çalışmada malzeme içerisindeki ağırlık olarak Ni miktarı artarken malzemenin çekme dayanımının arttığı ve % uzama değerinin ise azaldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, literatürde bulunan çalışmalar ile uyusmaktadır. [15-17]. Örneğin Getting et al. yaptığı çalışmada Molibden toz metal çeliklerinin mekanik özellikleri üzerine Ni ilavesinin etkisini araştırmıştır. Elde ettiği sonuçlar, ilave edilen Ni miktarının artması ile üretilen toz metal çeliğin sertlik ve çekme dayanımının arttığı ve % uzama miktarının azaldığını tespit etmişlerdir [17].

3.2. Mikroyapı (Microstructure)

Numunelerin mikroyapı resimleri Şekil 3'de görülmektedir. Şekil 3'de görülen mikroyapı resimleri incelendiğinde tane sınırlarında ve tane içerisinde kısmen kapanmamış gözeneklerin olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. Farklı nikel oranlarına sahip numunelerin mikroyapı görüntüleri (500X), (a) Alaşım 1, (b) Alaşım 2, (c) Alaşım 3, (d) Alaşım 4 ve (e) Alaşım 5. (Micrographs of specimens with different nickel contents (500-1000 x). (a) Alloy 1, (b) Alloy 2, (c) Alloy 3, (d) Alloy 4 and (e) Alloy 5.)

Bir çok kaynakta gözenekliliğin dayanımı olumsuz etkilediği belirtilmekle birlikte gözeneklerin çok küçük ve küresel şekilli olması ve tane içi olması mekanik

özellikleri düşürmediği bildirilmiştir [4;7]. Çizelge 3, TM çelik numunelerin sinter sonrası yoğunluk ve % perlit miktarını vermektedir.

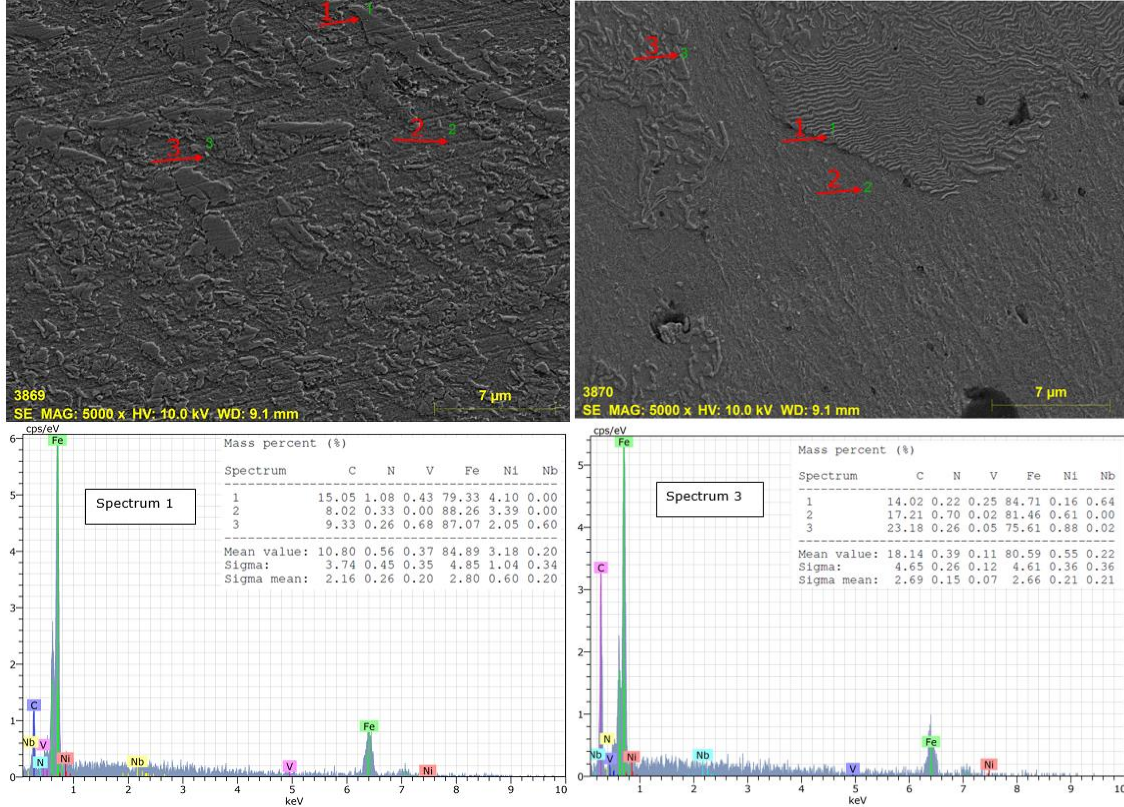
miktarının artması ile bey nitik yapısında olduğu düşünülmektedir. Nitekim Getting et al. yaptıkları çalışmada molibden toz metal çeliklerinin mekanik

Çizelge 3. TM çelik numunelerin Yoğunluk ve perlit miktarı.

Bileşim	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)	S. sonrası Yoğunluk (g/cm ³)	S. sonrası Yoğunluk (%)	Perlit Miktarı (%)
Alaşım 1	7,829	7,281	93	21,4
Alaşım 2	7,828	7,264	92,8	26,1
Alaşım 3	7,849	7,268	92,6	33,7
Alaşım 4	7,860	7,295	92,8	41,5
Alaşım 5	7,959	7,394	92,9	47,3

Numunelerin sinterleme sonrası yoğunlukları nikel oranının artması ile kayda değer bir değişime uğramadığı ve birbirine yakın olduğu görülmüştür. Toz metalurjisi ile üretilen parçaların mekanik özellikleri gözenek oranı ile ilişkilidir. Gözenekler gerilimin yoğunlaştığı merkezler olarak davranırken, çatlak ilerlemesine de katkı sağlamaktadır [4]. Demir esaslı T/M malzemelerin üretiminde, sinterleme sonrasında yavaş soğuma hızı nedeniyle, malzemenin mikroyapısı ferrit ve perlit şeklinde oluşmaktadır [57]. Şekil 3'de de görüldüğü gibi Alaşım 1 ve Alaşım 2 yapının perlit ve ferrit fazlarından oluşmaktadır. Nikel ilavesinin artması ile perlit miktarında bir artış gözlenmiştir. Bu beklenen bir durumdur. Literatürde bu sonucu destekleyen çalışmalar mevcuttur [2;12]. Bu çalışmada ilave edilen Ni

özellikleri üzerine Ni ilavesinin etkisini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlar, ilave edilen Ni miktarının artması ile üretilen toz metal çeliklerin sertlik ve çekme dayanımı gibi mekanik özelliklerinin iyileştiğini göstermektedir. Ayrıca mikroyapı incelemelerinde Ni içermeyen molibden çeliğinin mikroyapısının ferrit ve perlitten oluştuğu ancak bu tür toz alaşımların içerisinde nikel miktarının ağırlık olarak %0- 2 bulunması durumunda mikroyapıda daha sert fazların oluştuğunu ve nikel miktarı ağırlık olarak %2-5 arasında olması durumunda ise bey nit ve martenzit fazlarının bulunduğunu ifade etmişlerdir [13]. Nikel elementi bir çok element ile (karbon, bakır ve molibden gibi) karşılaştırıldığında, sahip olduğu difüzyon katsayısı değeri daha düşük olduğundan demir içerisinde en yavaş yayılımı gösterir



Şekil 4. Alaşım 5 SEM mikroyapı ve nokta EDS sonuçları (SEM micrograph Alloy 5 and corresponding EDS of the indicated points).

[13-14]. Nikel elementinin bazen homojen dağılmadığı ve Ni elementince zengin bölgelerin olduğu SEM nokta EDS ile gözlenmiştir. Bu durum, Tracey [13] ve Upadyaya'nın [14] çalışmalarında belirtildiği gibi, nikel difüzyon katsayısının düşük olması ve sinterleme esnasında yeterince yayınamamalarından kaynaklanmaktadır. Şekil 4'te % 5 Ni ilave edilmiş numunenin SEM nokta EDS sonuçları görülmektedir. Alınan nokta EDS'lerde nikel elementinin matris içerisinde homojen dağılmadığı ve bazı bölgelerde nikelce zengin alanlar oluştuğunu tespit edilmiştir. Bu durum, nikel difüzyon katsayılarının düşük olması ve sinterleme esnasında yeterince yayınamamasından kaynaklanmaktadır. Alaşım 1 ve Alaşım 2'nin ortalama tane boyutu hesaplandığında Alaşım 1'in ortalama tane boyutu 34 µm iken (Nb-V) ilavesi ile Alaşım 2'nin ortalama tane boyutu 29µm'ye düştüğü görülmektedir. Bu durumun sinterleme sırasında oluşan VC, VN, VC(N), NbC, NbN ve NbC(N) çökeltilerinin östenit tanelerinin büyümesini engellemesiyle ortaya çıkmaktadır [14]. Mikroalaşım elementlerinin özelliklerinden birtanesi oluşturmuş oldukları karbür ve nitürler ile östenitleme veya sinterleme sırasında tane büyümesini engellemeleridir. Östenitleme sırasında küçük çökeltilerin oluşması östenit tanelerinin büyümesini engeller ve soğuma sırasında küçük ferrit tanelerinin oluşmasına neden olur [18-21]. NbC çökeltilerinin çözünürlüğü TiC çökeltilerine çok benzer ve östenit tane büyümesini engelleyerek küçük ferrit tanelerinin oluşmasına katkı sağlar [21]. Sinterleme sıcaklığında çözünmeyen çökeltiler östenit tane büyümesini engelleyerek küçük ferrit tanelerinin oluşmasına neden olmaktadır. Özellikle östenit bölgesinde (900°C-1300°C) deformasyon miktarına bağlı olarak oluşan NbC çökeltilerinin yeniden kristalleşmeyi engellediği ve küçük ferrit tanelerini oluşturduğu bilinmektedir [22-24]. Ayrıca VC, VN ve VCN çökeltileri östenit bölgesinde ve östenit-ferrit dönüşümü esnasında tane büyümesini engelleyerek küçük ferrit tanelerinin oluşmasını sağlar [25]. (Nb-V) ilavesi ile üretilen çeliklerin akma ve çekme dayanımları artarken tane boyutlarının azaldığı gözlenmiştir. Bu durumun sinterleme sırasında oluşan VC, VN, VC(N), NbC, NbN ve NbC(N) çökeltilerinin östenit tanelerinin büyümesini engellemesiyle ortaya çıktığı düşünülmektedir. Nitekim literatürdeki yapılan çalışmalar bu sonucu destekler niteliktedir. Örneğin Erden ve Gökçe, yaptıkları çalışmada farklı sinterleme ortamlarında farklı oranlarda Nb-V mikroalaşım elementi içeren mikroalaşım çeliğini üretimi gerçekleştirmişlerdir. Üretilen çeliklerde Nb-V miktarının artması ile çeliklerin akma dayanımı çekme dayanımı artarken ortalama tane boyutunun düştüğünü gözlenmiştir [26].

4. GENEL SONUÇLAR (GENERAL CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, % ağırlıkça % 0,55 grafit ve % 0,15 (Nb-V) içeren demir esaslı malzemelerde Ni ilavesinin (% ağırlıkça 2, 3 ve 5) mikroyapı ve mekanik özellikler

üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1-Toz metalürjisi yöntemiyle Ni içeren çelik üretimi gerçekleştirilmiştir.

2-Bütün Ni oranları için ağırlık olarak % 5 nikel ilave edilen numunelerin en yüksek akma dayanımına (YS) ve çekme dayanımına (UTS) sahip olduğu % uzama olarak Alaşım 1 ve Alaşım 2'den daha düşük olduğu görülmüştür.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi BAP projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. KBÜ-BAP-16/1-YL-152 nolu projemize vermiş olduğu destekten dolayı Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Kordinatörlüğüne teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Erden M. A. "Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen mikroalaşım çeliklerinin mikroyapı mekanik özellik ilişkisinin araştırılması", *Doktora Tezi*, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (2015).
2. Aşkun Y., Hasırcı H., Şeker U., "Ni ve Cu ile Alaşımlandırılmış Küresel Grafitli Dökme Demirlerin İşlenebilirliğinin Kesme Kuvvetleri Ve Yüzey Kaliteleri Açısından Değerlendirilmesi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1): 191-199, (2003).
3. Robert, M., "Powder Metallurgy Science", *Metal Powder Industry Federation*, New Jersey, (1984).
4. Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., "Toz metalürjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri", *Türk Toz Metalurjisi Yayınları*, 05, Anlara, 2007.
5. Schade C, Murphy T, Lawley A, Doherty R., "Microstructure and mechanical properties of microalloyed PM steels", *Int J of Powder Metall.*, 48: 51-59, (2012).
6. Mutlu, İ. Alüminyum Matrisli Metal Kompozit Malzemelerin Üretilmesi, *Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi (TATED)*, 4(1): 31-36, (2012).
7. Erden M. A., Gündüz S., Türkmen M., Karabulut H., "Microstructural characterization and mechanical properties of microalloyed powder metallurgy steels", *Materials Science and Engineering A*, 616: 201-206, (2014).
8. Doğan Ö. N., Hawk, J. A., Tylczak J. H., "Wear of cast chromium steels with TiC reinforcements", *Wear*, 250: 462-469 (2001).
9. Wang, Y. S., Zhang, X. Y., Fengchun L., Guangting Z., "Study on and Fe-TiC surface composite produced in situ", *Mater. Des.*, 20: 233-236 (1999).
10. Wang, J., Wang, Y., Ding, Y., "Production of (Ti, V)C reinforced Fe matrix composites", *Materials Science and Engineering A*, 445-455: 75-79 (2007).
11. Kalathur S. N. and Frederick J.S. "Sintering of powder premixes – a brief overview" *Hoeganaes Corporation*, 1001 Taylors lane, Cinnaminson, NJ 08077, Paper No. 2007-01-0145 (2007).
12. Erden M. A., Gündüz S., Türkmen M., Karabulut H., "The Effect of V Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Low Carbon Microalloyed Powder Metallurgy Steels", *Materials Testing*, 58(5): 433-437, (2016).
13. Tracey, V. A., "Nickel Sintered Steels: Development, Status and Prospects", *Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials*, 5: 303-314, ed:J.M.Capus,

- R.M.German, , 21-26 June, San Francisco, California, USA (1992).
14. Upadhyaya, G. S., “Sintered Metallic and Ceramic Materials-Sintered Low-Alloy Ferrous Materials”, *John Wiley & Sons LTD*, West Sussex, England, (2000).
 15. Savaşkan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Derya Kitabevi, Trabzon, (1999).
 16. Torralba, J. M., “Microstructures:Low Alloyed Steels”, *A Residential Training Course for Young Materials/Design Engineers*, 2: 395-428, (2007).
 17. Gething, B. A., Heaney, D. F., Koss, D. A.,Mueller T. J., “The Effect of Nickel on the Mechanical Behavior of Molybdenum P/M Steels”, *Materials Science and Engineering A*, 390: 19–26, (2005).
 18. Ollilainen V., Kasprzak W., Hollapa L., “The effect of silicon, vanadium and nitrogen on the microstructure and hardness of air cooled medium carbon low alloy steel”, *Journal of Metarials Processing Technology*, 134: 405-412 (2003).
 19. Xiang-dong H., Xin-ping M., Sheng-xia L., “Effect of annealing temperature on recrystallization behavior of cold rolled Ti-microalloyed steel” *J. of Iron and Steel Res Int.*, 20 (9): 105-110 (2013).
 20. Bakkali E. H. F., Chenaouia A., Dkiouaka R., Elbakkalib L. A. O. A., “Characterization of deformation stability of medium carbon microalloyed steel during hot forging using phenomenological and continuum criteria”, *J. Mater. Proc. Tech.*, 140–149 (2008;1999).
 21. Gladman T., “The physical metallurgy of microalloyed steels”, *The Institute of Materials*, England, 1, 341 (1997).
 22. Dutta B., Sellars C. M., “Strengthening of austenite by niobium during hot rolling of microalloyed steel”, *Mater Sci Technol.*, 2: 146–153 (1986).
 23. Sage A. M., “An overview of the use of mikroalloys in hsla steels with particular reference to vanadium and titanium, processing, properties and applications”, *Proceedings of the Second International Conference on HSLA Steels*, 51-61, (1992).
 24. Campos S.S., Kestenbach H.J., Morales E. V., “On strengthening mechanisms in commercial Nb-Ti hot strip steels”, *Metall. Mater. Trans. A.*, 32A: 245-1248, (2001).
 25. Baker T. N., “Process, microstructure and properties of vanadium microalloyed steels”, *Mater. Sci. Tech.*, 25: 1083-1107(2009).
 26. Erden M.A., Gökçe H., “The Effect of Sintering Atmosphere on Mechanical Properties of Nb-V Bsaed Microalloy Steels Produced by Powder Metallurgy Method” *SYLWAN*, 160(8): 362-375, (2016).

An Investigation on Shielding Effect of Bismuth on Lung Ct Scan Using Monte Carlo Simulation

¹Huseyin Ozan TEKIN, ²Tugba MANICI, ³Vishwanath P. SINGH

¹Uskudar University, Vocational School of Health Service, Radiotherapy Department, Istanbul, 34672, Turkey

²Uskudar University, Medical Radiation Research Center (USMERA), Istanbul, 34672, Turkey

³Karnatak University, Department of Physics, Dharwad, 580 003, India

(Received : 15.07.2016 ; Accepted : 07.08.2016)

ABSTRACT

Computed tomography (CT) related to computer-processed combination or X-ray images obtained from different angles to create patient's cross-sectional body parts images. CT is mostly associated with high radiation dose to organs during the diagnostic process. To provide the probable effect of bismuth shielding on dose reduction to organs and investigation of applicability of Monte Carlo (MC) method. Monte Carlo (MC) method has been used for calculation of dose attenuation properties of bismuth. MCNPX (version 2.4.0) has been used during the calculations. In this study, validation of modeled MCNPX simulation geometry has been provided by calculating the mass attenuation coefficient values of lung and comparing with previous available studies in literature for lung. Our results agreed well with other results about mass attenuation coefficients of lung. By using the validated MC model, dose attenuation properties of bismuth have been investigated. Dose reduction rates of bismuth on lung have been compared with experimental studies. With bismuth shielding, absorbed dose amount in lung significantly reduced. It can be concluded from MC results that the bismuth shielding reduced lung dose significantly in x-ray CT examination of thorax region.

Key Words: Dose Reduction, Bismuth Shielding, Monte Carlo

1. INTRODUCTION

The use of X-ray in medical applications is the major artificial source for population received radiation. One of these applications is known as Computed Tomography (CT). CT is an imaging technique which produces cross-sectional images of body and representing in each pixel the local X-ray attenuation properties of the body. The imaging technology and capabilities of CT scanners have developed enormously in the early 1990's since the introduction of helical computed tomography (CT). The increasing requisition for CT examinations had a considerable impact on doses ensured to patients and on the exposure of the population completely [1]. Same as with the all medical applications utilizing ionizing radiation exposure, it is an important issue that reduce the exposure dose of patient and staff as low as reasonably achievable (ALARA). Different types of CT scans, are named for different uses or for what images they are trying to record and one of them is called as thoracic CT. Thoracic CT is an imaging method that uses x-rays to create cross-sectional pictures of the chest and upper abdomen. It turned out the most proper technique for lung examinations [2]. [DAMI]. There are many steps that can be taken in order to reduce the radiation dose on a patient. One of such steps is to locate an absorbing material onto the patient surface and outside of the anatomy of interest [3]. Bismuth shielding was

recommended for use in CT examinations in previous studies [4-9]. This study aimed providing the validation of modeled Monte Carlo geometry and simulation setup by using MCNPX code during the investigation of radiation attenuation properties of bismuth shielding material in CT scans. MCNPX is a general purpose radiation transport code for modeling the interaction of radiation with materials and also tracks all particles at all energies. MCNPX is fully three-dimensional and it utilizes extended nuclear cross section libraries and uses physics models for particle types [10]. The capability of MCNPX as a suitable and strong code has been studied in literature. The capability of MCNPX Monte Carlo code on detection efficiency and using of different experimental and Monte Carlo studies has been studied by Akkurt et al. [11]. Also using conditions of MCNPX for dose distribution in PET-CT facility has been studied by Tekin et al [12].

The effective performance of shielding used to reduce the unnecessary radiation dose of CT examinations has been reported by Kyung-Hwan et al. [13]. The aim of the present study was to investigate effectiveness of bismuth shielding on lung during CT scan using Monte Carlo method simulation. Therefore, we defined a simulation geometry and provided the validity via comparing the calculated mass attenuation coefficients of lung with other studies. The mass attenuation coefficient μ_m is one of the most important parameter for characterizing the penetration and diffusion of gamma-rays in objective material [17]. In this study, validation of modeled MCNPX simulation geometry for calculation has been provided by comparing numerical simulation results on mass attenuation coefficients results for lung. Thus, validated simulation geometry of MCNPX has been used

*Corresponding Author

e-posta: huseyinozan.tekin@uskudar.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 617-622

for investigation of dose attenuation properties of bismuth and effects on absorbed dose amount in lung.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1. Validation of MCNPX

The coefficient μ_m is a density independent coefficient and determined for investigated attenuator materials by transmission method according to Lambert-Beer's law $\mu_m \cdot x = \ln(I_0/I)$; where I_0 and I are the incident and attenuated photon intensity, respectively. $\mu_m(\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ is the mass attenuation coefficient and x is the thickness of the slab. To provide the validation of modeled MCNPX simulation geometry, the gamma-ray mass attenuation coefficients of lung were calculated at 60 keV, 80 keV, 150 keV, 400 keV, 500 keV, 600 keV, 1000 keV, 1250 keV, 1500 keV, 2000 keV photon energies. In Fig. 1, a modeled and defined lung section has been located between the lead (Pb) collimated gamma-ray source and detection area. The geometric center of detection area was considered for location of point source.

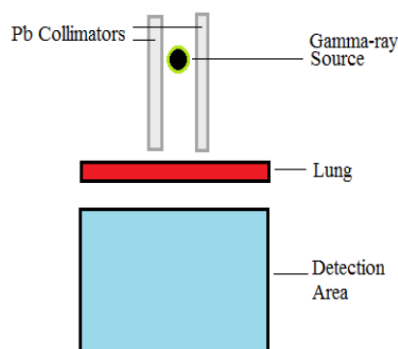


Figure 1. Schematic view of geometry for mass attenuation coefficient of lung

Gamma-ray sources at different energies have been defined in data card section of MCNPX input by considering different variable such as CEL, ERG, DIR, POS, and PAR. The geometric center of detection cell has been considered for location of point source. Each variable has different abilities during Monte Carlo simulation. In present study, our variables commanded source cell, energy, direction, source position and particle type, respectively. On the other hand, one of important definition is material specification by considering atomic number, mass number and density (d) for pure elemental materials and atomic number, elemental mass concentrations and density for compounds or mixtures. By considering these variables, we defined the lung, radiation sources, Pb collimators and detection area in input file respectively. The elemental mass concentrations and density of lung [18] have been presented in Table 1.

As a variance reduction technique, the mother volume cell has been optimized by considering total simulation area to reduce statistical error and unnecessary particle

tracking in simulation. In the MCNPX simulation process 106 photons were used as a number of particle. MC calculations were done by using Intel® Core™ i7 CPU 2.80 GHz computer hardware. The calculated mass attenuation coefficients results of this study and results from the previous studies in literature are presented in Table 2. Moreover, the uncertainties have been calculated via standard deviation and reported in Table 2. The simulation geometry of MCNPX will be used for assessment of effect shielding effect of bismuth on lung during thoracic CT scan.

Table 1. Elemental concentrations of lung ($d= 1.05 \text{ g/cm}^3$)

Element	Elemental concentrations (%)
H	0.10127
N	0.02865
Na	0.00184
O	0.75707
Cl	0.00266
Mg	0.00073
P	0.00080
Fe	0.00037
Ca	0.00009
Zn	0.00001
K	0.00194
C	0.10231
S	0.00225

2.2. Bismuth Shielding, Lung Phantom and Simulation

In the next step, validated simulation geometry has been used for investigation of dose reduction effect of bismuth shielding on lung. As the energy source in input file, the X-ray spectrum energies from 100 keV to 160 keV have been used to obtain spectrum of the CT system. SpelCalc program [20] has been used to obtain spectrum to simulate the beam of CT system. SpekCalc is primarily designed to be used in medical physics for both research and education aims. Noteworthy is the particularly wide range of tube potentials (40-300 keV) and anode angles that can be modeled: the program can therefore be potentially useful to those working in superficial and orthovoltage radiotherapy, as well as in diagnostic radiology. The obtained X-ray spectrum has been defined as a source spectrum in MCNPX input. A lung phantom and Pb shielding materials to reduce backscattered photons have been defined respectively.

In Fig.3a and Fig.3b schematic view of simulation setup with and without bismuth shielding for MCNPX simulation is shown. In the MCNPX simulation process 106 photons were used as a number of particle. To obtain absorbed dose amount in lung phantom, energy

Table 2. Mass attenuation coefficient values for lung ($d= 1.05 \text{ g/cm}^3$)

Photon Energies (keV)	This Study (MCNPX)	FLUKA	GEANT4	XCOM	NIST
60	0,20270 \pm 0,00009	0.20323	0.18919	0.20520	0.20530
80	0,18110 \pm 0,00006	0.18380	0.17419	0.18240	0.18260
150	0,14900 \pm 0,00008	0.14833	0.14702	0.14910	0.14930
400	0,10350 \pm 0,00009	0.10461	0.10382	0.10510	0.10530
500	0,09520 \pm 0,00012	0.09585	0.09596	0.09592	0.09607
600	0,09010 \pm 0,00014	0.08911	0.08915	0.08869	0.08882
1000	0,06980 \pm 0,00007	0.07071	0.07006	0.07002	0.07013
1250	0,06010 \pm 0,00008	0.06182	0.06199	0.06262	0.06271
1500	0,05690 \pm 0,00006	0.05684	0.05649	0.05698	0.05706
2000	0,04930 \pm 0,00007	0.04909	0.04831	0.04893	0.04900

deposition mesh tally (F6) has been used as a mesh tally. This type of tally in MCNPX scores energy deposition data in which energy deposited per unit volume from all particles is included [21]. However, as an importance definition in input file, we defined the photon (imp:p 1) as a considered particle type to calculate energy deposition in lung phantom. Of course, this type of approach is a variance reduction method to reduce statistical error in simulation. Eventually, X-ray beam has been directed on to the lung phantom and energy deposition has been observed in both calculations.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Mass Attenuation Coefficient

The mass attenuation coefficients of the lung using MCNPX simulation are given in Table.2 along with previously reported results in literature [14], XCOM data [15] and NIST values [16]. The values obtained using MCNPX compared at various energies from the 60 keV until 2000 keV photon energy. Here during the validation process the modeled MCNPX simulation geometry, not only well-known Monte Carlo code data

such as GEANT4 and FLUKA have been used but also standard XCOM and NIST data also have been used for comparison. During the comparison, we obtained some small differences between results. It can be concluded that, since each Monte Carlo code has their own libraries for cross-section data, the results can be different from each other with small differences. Thus, we provided the opportunity to evaluate our results in a large data table. This approach provided accordance between the both studies such as validation of modeled simulation geometry and results. Mass attenuation coefficients versus different photon energies for lung have been presented graphically also in Fig.2.

During the validation, mass attenuation coefficients for lung were found comparable with NIST standard data and other investigations. However, by this validation study, we provided an opportunity to compare our results not only with other well-known Monte Carlo codes such as FLUKA and GEANT4 but also with XCOM and NIST data. On the other hand, at some energy values, the results

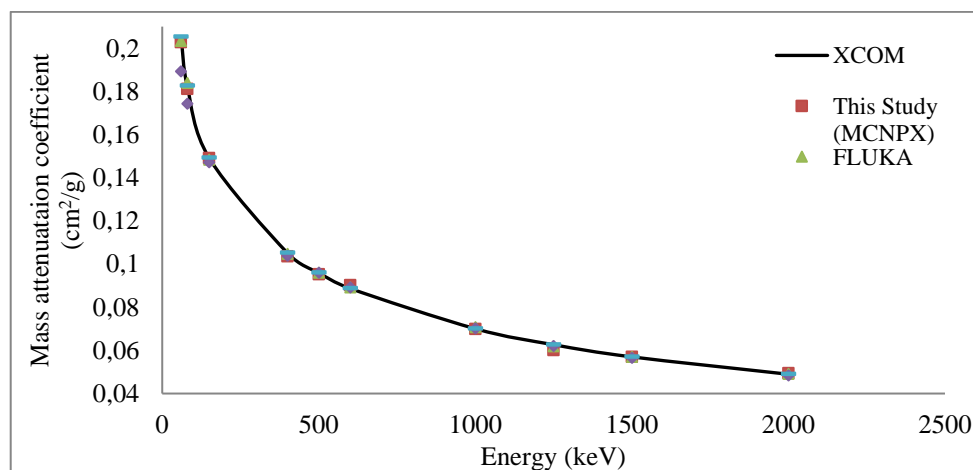


Figure 2. Mass attenuation coefficients versus different photon energies for lung

Table 3. Effect of bismuth shielding material and dose reduction.

Energy (keV)	Deposited Energy with Bismuth Shielding (a.u)	Deposited Energy without Bismuth Shielding (a.u)	Dose Reduction (%)
100	5,50E-05	1,08E-04	49,25722615
120	1,00E-04	1,30E-04	22,76889719
140	1,21E-04	1,43E-04	15,74533164
160	1,32E-04	1,51E-04	13,05602896

shows that our data are more closer to NIST values than FLUKA and GEANT4.

3.2 Bismuth Shielding Effect

The validated simulation geometry has been used during the investigation of bismuth shielding and its effect on deposited energy reduction in lung. As shown in Fig.4, both calculation that no shielded lung phantom energy deposition and bismuth shielded lung phantom energy deposition have been presented. For modeled lung phantom, the average deposited energy amounts have been compared respectively. A progressive decrease in deposited energy amount in lung phantom was achieved by the addition of bismuth shielding material. However, dose reduction rates have not been achieved in same rates because of relationship between increasing energy values and dose attenuation properties of attenuator material. Lung absorbed dose rates have been presented in Table 3. As it can be seen from the Table 3, dose reduction rates have been decreased by increased energy.

The results showed that bismuth is a well attenuator material for mentioned energy range between 100 keV and 160 keV which is the average CT energy range in diagnostic scans for patients. The results generally agreed with some other experimental studies undertaken on bismuth shielding [22-23]. On the other hand, effect of attenuator materials on image quality is an important subject to consider. However, Chang K-H et.al 2010, reported that by using the bismuth shielding, the dose of the critical organs could be considerably reduced without degrading the image quality. This study considered only the attenuation properties of bismuth shielding in the energy range of 100 keV to 160 keV on lung. Certainly, in a thoracic CT examination breast tissue could be the first attenuator before the lung but since the breast and lung have almost the similar densities and previous bismuth shielding studies achieved significant dose reduction on breast tissue, it can be concluded that dose attenuation properties of bismuth is significant.

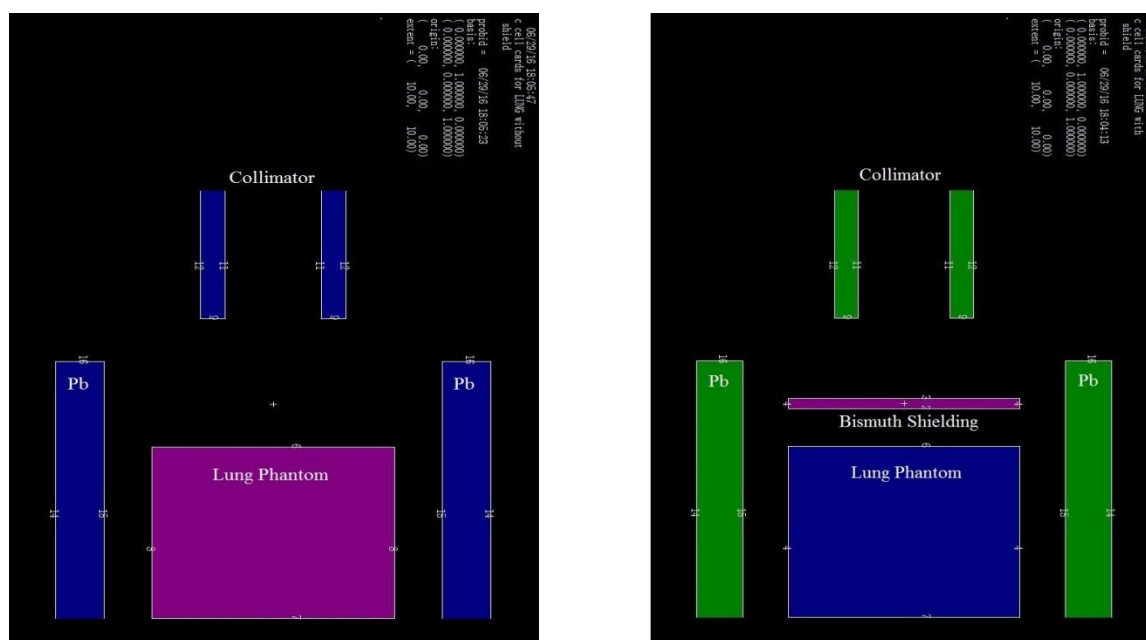


Figure 3 (a) Schematic view of simulation setup without bismuth shielding (b) Schematic view of simulation setup with bismuth shielding

The variation of dose reduction rate from 100 keV to 120 keV has been observed as highest decrease as % 27±. In addition, variation of dose reduction rate from 120 keV to 140 keV was around %7± and from 140 keV to 160 keV was around %2± respectively. In this study, relative error has been achieved less than % 0.1 and it can be considered as small relative error rate for a medical application based Monte Carlo simulation.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

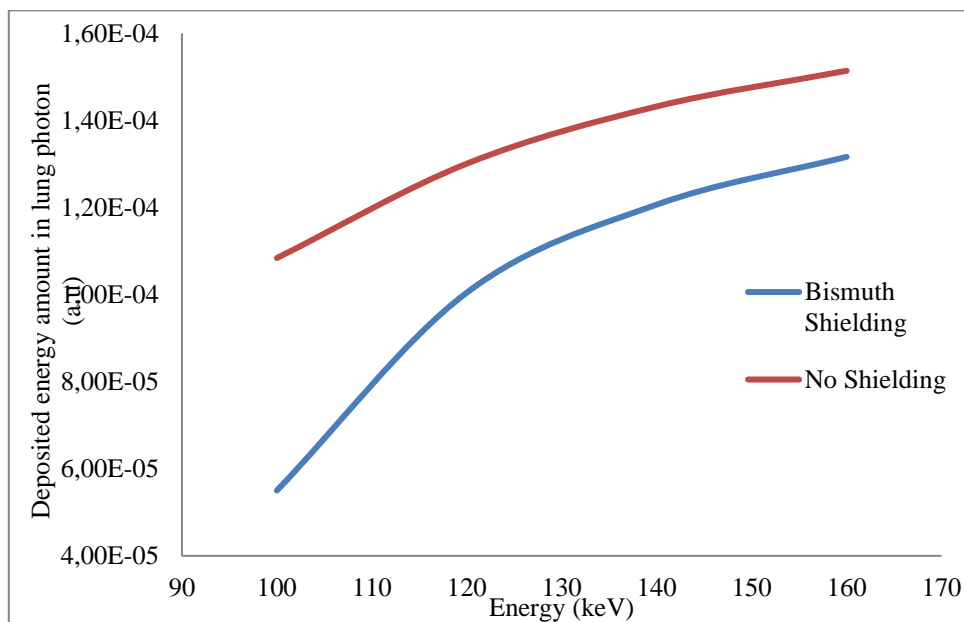


Figure 4. Comparison of deposited energy amount in lung photon versus energy

4. CONCLUSION

In this study, effect of bismuth shielding on lung during CT scan using Monte Carlo simulation has been reported. During the validation, mass attenuation coefficients for lung were found comparable with NIST standard data and other investigations. The values obtained using MCNPX compared at various energies from the 60 keV until 2000 keV photon energy. The standard simulation geometry has been used for investigation of bismuth shielding and its effect on deposited energy reduction in lung. The results showed that bismuth is a very effective shielding material for CT energy range (100 keV to 160 keV) in diagnostic scans for patients energy. It can be concluded that the Monte Carlo simulation is a strong tool and it is an alternate method for experiment due to flexibility and convenience in defining geometry. This standard geometry can be utilised for investigation of shielding effects on other human organ for radiation protection, medical diagnostic and discussion with ICRP and IAEA.

REFERENCES

- [1] Goldman, L.W., Principles of CT: radiation dose and image quality. *J. Nucl. Med. Technol.*: 213–225, (2007).
- [2] Kalra, M.K., Maher, M.M., Toth, T.L., Hamberg, L.M., Blake, A.M., Shepard, J.A., Saini, S., 2004. Strategies for CTR adiation Dose Optimization. *J. Radiol.* 230: 619–628, (2004).
- [3] Iball, G. R., & Brettle, D. S. Organ and effective dose reduction in adult chest CT using abdominal lead shielding. *The British Journal of Radiology*, 84:(1007), 1020–1026, (2011) <http://doi.org/10.1259/bjr/53865832>.
- [4] Nan-Ku et al., Real-time estimation of dose reduction for pediatric CT using bismuth shielding. *Radiation Measurements* 46: 2039–204, (2011).
- [5] Kenneth D. 2001. Radioprotection to the Eye During CT Scanning. *AJNR Am J Neuroradiol*, 22: 1194–1198, (2001).
- [6] Huggett J. A Phantom-Based Evaluation Of Three Commercially Available Patient Organ Shields for Computed Tomography X-Ray Examinations in Diagnostic Radiology. *Radiation Protection Dosimetry* 155(2): 161–168, (2013).
- [7] Einstein A.J. et al., Effect of bismuth breast shielding on radiation dose and image quality in coronary CT angiography. *Journal of Nuclear Cardiology*, 19(1): 100–108.

- [8] Wang J. Radiation doser reduction to the breast in thoracic CT: Comparison of bismuth shielding, organ-based tube current modulation, and use of a globally decreased tube current. *Medical Physics* 38, 6084 (2011).
- [9] Wang J. Bismuth Shielding, Organ-based Tube Current Modulation, and Global Reduction of Tube Current for Dose Reduction to the Eye at Head CT. *RSNA Radiology*, 262: 191–198, (2012).
- [10] RSICC Computer Code Collection (2002). MCNPX User's Manual Version 2.4.0. Monte Carlo N-Particle Transport Code System for Multiple and High Energy Applications.
- [11] Akkurt I, Tekin H.O., Mesbahi A. Calculation of Detection Efficiency for the Gamma Detector using MCNP-X” *Acta Physica Polonica A.*, 128(2): 332-334, (2015).
- [12] Tekin H.O. and Kara U. “Monte Carlo Simulation for Distance and Absorbed Dose Calculations in a PET-CT Facility by using MCNP-X” *Journal of Communication and Computer* 13: 32-35, (2016).
- [13] Chang K-H. et.al. Dose Reduction In CT Using Bismuth Shielding: Measurements And Monte Carlo Simulations. *Radiation Protection Dosimetry*, 138(4): 382–388, (2010).
- [14] Ermis E.E.et.al. 2016. A comprehensive study for mass attenuation coefficients of different parts of the human body through Monte Carlo Methods. *Nucl Sci. Tech.* 27: 54, (2016).
- [15] 2. M.J. Berger, J.H. Hubbell, 1987. Photon Cross section on a Personal Computer (XCOM). NBSIR87-3597 (National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg,
- [16] National Institute of Standards and Technology (NIST), X-ray mass attenuation coefficients. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab4.html>.
- [17] Abdel-Rahman MA, Badawi EA, Abdel-Hady YL, Kamel N. Effect of sample thickness on the measured mass attenuation coefficients of some compounds and elements for 59.54, 661.6 and 1332.5 keV c-rays. *Nucl Instrum Methods Phys Res A* 447: 432–436, (2000).
- [18] ICRU, Tissue Substitutes in Radiation Dosimetry and Measurement, Report 44 of the International Commission on Radiation Units and Measurements (Bethesda, MD, 1989)
- [19] Kubo T et.al., Radiation Dose Reduction in Chest CT: A Review. *American Journal of Roentgenology* 190: 335-343, (2008).
- [20] Poludniowski G. Et al., 2009. SpekCalc: A Program to Calculate Photon Spectra from Tungsten Anode X-Ray Tube. *Phys. Med. Biol.*, 54(19): 433-438.
- [21] RSICC Computer Code Collection, 2002. MCNPX 2.4.0 Monte Carlo N-Particle Transport Code System for Multiparticle and High Energy Applications, OAK Ridge National Laboratory.
- [22] McCollough, C. et.al, 2009. Strategies for reducing radiation dose in CT. *Radiol. Clin. North Am.* 47(1), 27–40.
- [23] Wang, J. et.al., Radiation doser reduction to the breast in thoracic CT: comparison of bismuth shielding, organ-based tube current modulation, and use of a globally decreased tube current. *Med. Phys.* 38(11): 6084–6092, (2011).

Short Review on Laser Texturing and Cleaning Carbon Fibre Composites for Aerospace Applications

Hüseyin Kürşad SEZER

Industrial Design Engineering, Technology Faculty, Gazi University, Ankara, 06500, Turkey.

(Received : 27.06.2016 ; Accepted : 28.07.2016)

ABSTRACT

Carbon fibre reinforced polymer composites are increasingly being used in aircrafts especially for wing and tail components and automotive applications. Surface wettability of these thermoplastic composites is poor due to low surface energies causing difficulty in the surface painting process where necessary. To achieve durable painting the composite surface needs pre- treatment to modify the surface wettability, to remove surface contaminants, and loose, friable surfaces for better paint adhesion. Conventional surface treatments such as sand blasting, mechanical abrasion and chemical etching may cause delamination defects and damage to the brittle fibers affecting service life of the bulk composite. These methods also present occupational health, safety and environmental risks. This article reviewed texturing and cleaning of polymer, composites and metallic surfaces for enhancing adhesion performance in general and, in particular, the laser texturing and cleaning which is a potential substitute to conventional surface modification techniques of composites.

Key Words: laser texturing, surface treatment, carbon fiber composites.

1. INTRODUCTION

Paint deposition onto a substrate is important for a number of industrial processes protecting the substrate from corrosion and wear. Painting and many other coating processes such as electrolytic and chemical plating, physical deposition and chemical vapor deposition (CVD) require the substrate surface to have a texture to allow the deposit firmly held and enhance adhesion. This is particularly necessary for polymer matrix carbon fibre composites as many polymers exhibit low adhesion characteristics [1, 2]. Texturing can provide increased surface area and provide a bond through mechanical locking of the paint to a composite. The ultimate goal of the surface treatment is to modify a thin layer at the surface to obtain more favorable chemical and morphological structure for paint adhesion without affecting the bulk properties.

Wide range of contaminants can be found on the composite surfaces and by their nature may form weak boundary layer under the paint [3]. Various techniques have been used to clean contaminants and provide a textured surface such as sand or grit blasting, chemical cleaning or treatment to etch the surface with acid and other corrosive type materials. Many of these cleaning and/or texturing processes are not commercially suitable due to high cost and serious environmental concerns owing to the use of dangerous substances which often require safe handling and environmental disposal after use. Once the surface has been cleaned and structured, the desired deposition material is normally applied by any conventional method including brushing, spraying, dipping, roll coating, electrostatic coating or immersion. Laser texturing is a potential substitute to conventional surface modification techniques in some applications.

Virtually any type of material can be processed using short pulsed lasers without contamination and damage to the substrate. In laser texturing process a focused laser beam is used to ablate a microlayer of the surface in a controlled way in order to alter the surface morphology or produce local melting and controlled surface microwaviness. The latter is particularly valuable since previous studies have demonstrated that controllable micro- or nano-roughness enhances the adhesion of subsequently applied layers. This article reviews texturing and cleaning of polymers, composites and metallic surfaces for enhancing adhesion performance in general and the laser texturing and cleaning of composites in particular.

2. SURFACE PREPARATION FOR ADHESION PERFORMANCE

Objectives in surface treatment for improved adhesion of surfaces can be described as follows:

1. Cleaning of surface contaminants
2. Increasing surface free energy for improved wettability
3. Increasing surface roughness for improved mechanical interlocking or bondable surface area

Contaminants can be found on the composite surfaces and by their nature form a weak boundary layer in a bond. These contaminants include silicones from release agents and bagging materials, fluorocarbon release sprays and films, machining oils, fingerprints and components in the composite itself which have migrated to the surface, such as calcium stearate from self-releasing formulations, water and plasticizers. Table 1 gives evidence of chemical contamination by fluorine species (30%) for epoxy/carbon composite surface [4].

*Corresponding Author

e-mail: kursadsezer@gazi.edu.tr

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 623-631

Table 1. Chemical composition (%) of carbon/epoxy composite surface [4]

	C	O	N	F	Si	S	O/C
Carbon/Epoxy	56.4	8.1	1.5	32.2	1.8	-	0.14

Table 2. Roughness and surface free energy of bare surfaces [4]

	Roughness Ra (μm)	γ^{LW} (mJ/m^2)	γ^{AB} (mJ/m^2)	γ^{TOT} (mJ/m^2)
Glass/Epoxy	0.79 (± 0.08)	31.6 (± 1.11)	2.36 (± 0.42)	33.96 (± 1.51)
Carbon/Epoxy	0.81 (± 0.17)	38.54 (± 0.9)	1.13 (± 0.17)	39.67 (± 1)

Composites usually have very smooth and glossy moulded surfaces due to the use of fluorinated film as mold release agent in manufacturing, Table 2 [4]. Surface energies of composites tend to be low, Table 2, especially for the thermoplastic matrices making wetting of the surfaces difficult. To achieve durable painting the composite surface needs pre-treatment to modify the surface wettability and morphology and remove surface contaminants for better paint adhesion.

2.1. Surface Treatment Methods

Various chemical, mechanical and energetic surface treatment methods have been evaluated for the treatment of plastics and metals for bonding. These evaluations may also give indication of feasibility of their application to the surface preparation of fibre reinforced composite for painting process. Some techniques are summarized in Table 3.

Table 3. Surface pretreatment methods

Mechanical	Energetic	Chemical
Alumina grit blast	Corona discharge	Solvent Cleaning
Cryoblast	Plasma	Detergent Wash
Sodablast	Flame	Acid Etch
Peel ply	Excimer Laser	Primer
SiC abrasion		

2.1.1 Energetic Treatment Methods

Corona discharge technique uses energetic species in an electrical discharge produced from ionized air by applying high voltage between two electrodes above the treated surface. This process introduces chemical modification of the thermoplastic composites surfaces and increases wettability [5]. The aim is to improve interfacial contact and intrinsic adhesion for bonding using adhesives technology. The surface energy level and consequently the wettability of the electrical discharge treated thermoplastic composite can be increased (80° to $\sim 5^\circ$ water contact angle decrease) giving improved adhesion. The improved bond performance is related to chemical modification of the surfaces by increased type and concentration of oxygen containing groups released by X-ray photoelectron spectroscopy [5].

Plasma treatment has been increasingly used to modify the surface characteristics producing hydrophobic or hydrophilic surfaces on polymers and metals. Plasma is

an ionised gas containing both charged and neutral particles, such as electrons, ions, atoms, molecules and radicals. The treatment of composite materials by means of cold plasma increases surface wetting properties as well as improving mechanical strength in terms of adhesion between fibres and matrix [6]. The method used for surface activation of polymers allows the modification of surface characteristics to obtain improved bonding without affecting bulk properties [7]. Plasma causes ablation of both molecular layers and organic residues from the polymer surfaces and reported to produce an increase in surface's roughness [8]. This important phenomenon has been exploited for adhesive purposes through roughening the surface to increase the number of chemical links between coating and substrate. The cold plasma treatment of polypropylene surfaces to improve wettability and adhesion properties have been

widely studied topic. The water contact angle of the cold plasma treated samples using air gas can be reduced by 30 %. Samples painted with or without using a primer can give a good adhesion of the paint film. Therefore, it represents an efficient, clean and economic alternative to activate polymeric surfaces.

Various other studies have shown reactive energetic species in plasma such as ions and electrons formed from the gas interact with the surface and cause chemical changes [9,10]. The oxygen plasma treatment to improve adhesion bonding performance of the thermoplastic matrix composites gives much better bonding as compared to sand blasting using $150 \mu\text{m}$ particles, but comparable to chromic/sulphuric acid etching [9]. Figure 1 shows analysis of the plasma-treated surface, by SEM. The main effects of the treatment is increased surface roughness and carbonyl content. The plasma will not remove silicone release agent. The plasma treatment is more controllable than acid etching because the chromic

acid is very aggressive and can rapidly etch away the composite surface, Figure 1.

Surface modification of polyolefin automobile bumpers

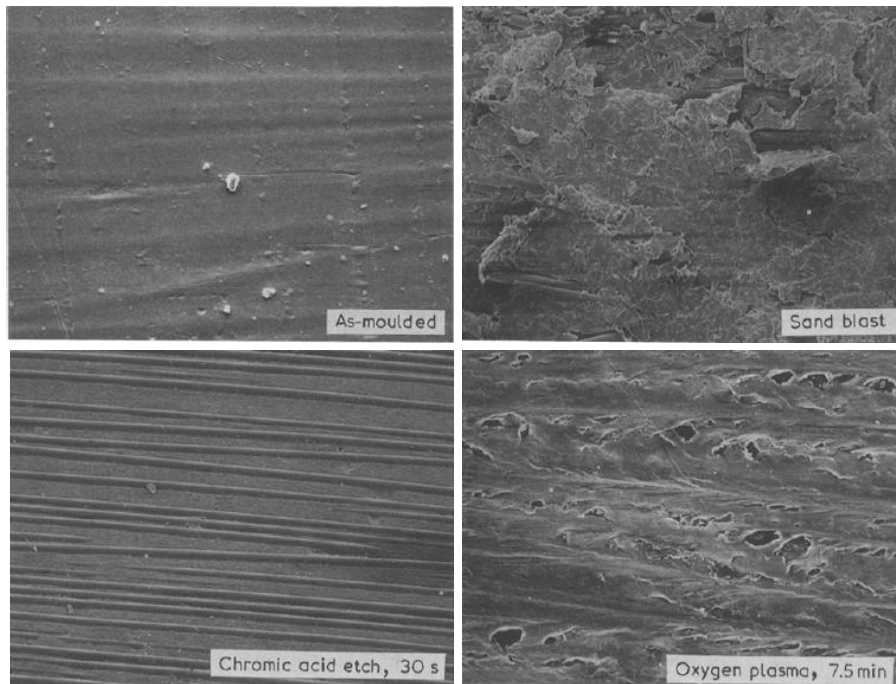


Figure 1. SEM images of the surface before and after treatment [9]

by using microwave technology with plasma treatment has also been shown to enhance wettability and paint adhesion properties [11]. The surface is degreased in detergent solution followed by cleaning with propanol before oxygen plasma treatment and microwave power. Figure 2 demonstrates the oxygen plasma treatment induced hydrophilic effect where the water contact angle is decreased significantly (from 70 to 30°) for the oxygen plasma-treated polyolefin samples. The hydrophilic effect is attributed to increased oxygen functional groups such as O-H and C-O-C on the polyolefin surface with microwave plasma treatment using oxygen gas. Adhesion tests of the plasma treated samples painted without the use of a primer showed improved adhesion [11].

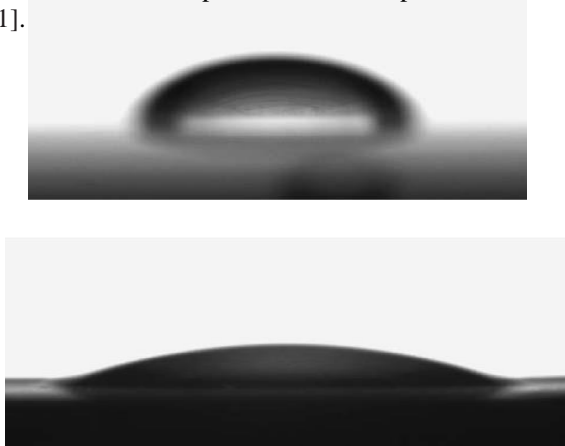


Figure 2. The contact angle of a water droplet on non-treated (a) and plasma treated polyolefin samples [11]

2.1.2. Mechanical Treatment Methods

Of the mechanical surface treatment methods peel ply is one of the more common surface pretreatments for

composite bonding [12, 13]. A peel ply is a layer of nylon or polyester fabric incorporated in the surface of a composite during its manufacture stripped off the surface immediately before bonding giving a rough and clean surface [13]. Several peel plies have allowed increase in surface roughness and surface cleaning efficiency and chemical modification [4]. Contact angle values also exhibited a sharp decrease resulting from peel ply use corresponding to increase of surface free energy, mostly due to the roughening of the composite surface as well as surface cleaning. Common surface contaminants like fluorinated or siliconed species are completely removed from the composite surface after peel ply treatment [4]. The surface cleaning and roughening lead to improved adhesion as evidenced by an increase of single lap shear values correlated with the increase in surface free energy. Crane et al [12] studied the effect of a variety of mechanical surface treatments, including a peel ply, on the wetting and bonding behaviour of carbon/epoxy composite surfaces. The treatments investigated included nylon and Nomex peel ply, and silicon carbide paper abrasion. It was found that the surface energy of the composite was approximately doubled from 30×10^{-5} to around $60 \times 10^{-5} \text{ mJ m}^{-2}$. A 25% improvement in lap shear strength over untreated carbon/epoxy was noted for the sanded samples, but no improvement in strength' was shown for the peel ply treated composites indicating no direct correlation with surface energy. Main problems with peel plies is the cross-transfer of contamination or release agents on the ply to the composite. The morphology of the surface obtained using a peel ply is a

very regular imprint of the weave of the fabric used, Figure. 3.

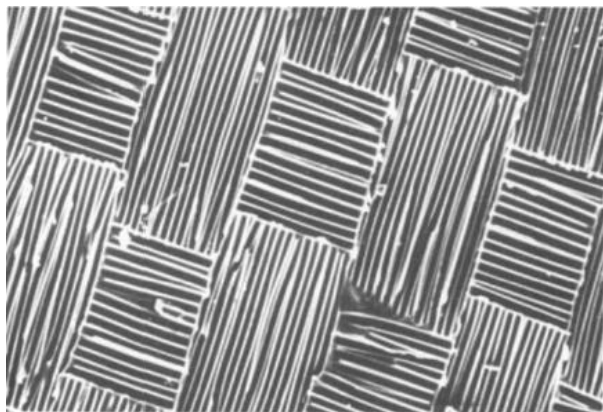


Figure 3. SEM micrograph of peel ply treated carbon/epoxy composite [14]

Alumina grit-blasting has also been suggested as a good mechanical surface treatment for carbon/epoxy composite [15]. The effect of alumina gritblasting is to modify the morphology of the surface and also to remove some surface contamination. The roughness introduced by the treatment will also affect the wetting of the composite. The variables in grit-blasting are the size of alumina grit, the blast pressure, the treatment time, theblast angle and the distance from the blast nozzle to the surface. Fibre damage can occur with most carbon- and glass-reinforced composites, even at low blast pressures and short treatment times as shown in Figure 4 [14]. Similarly silicon carbide abrasion also causes visible damage to carbon and glass fibres in the composite.

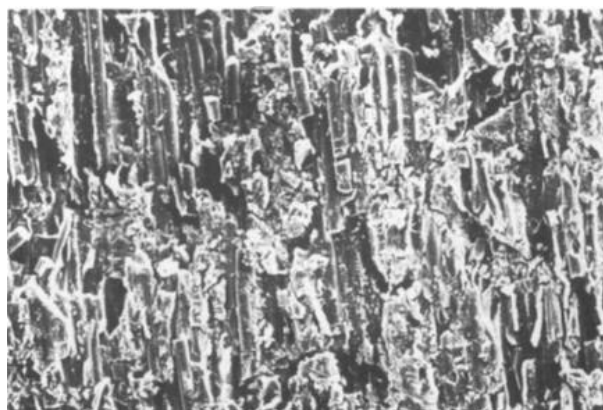


Figure 4. SEM micrograph of alumina gritblasted carbon/epoxy composite (magnification 300X) [14]

Parker and Waghorne have studied the effectiveness of mechanical treatments at removing chemical

contaminants such as fluorocarbons and silicones from carbon/epoxy surfaces [16]. Alumina gritblasting and silicon carbide abrasion were found to be superior to Scotchbrite abrasion but no technique completely removed all contaminants. The direct effect, therefore, of the mechanical treatments on adhesion properties was confused by the detrimental effect of residual contamination, although the best joint strengths were obtained for grit-blasted substrates.

3. LASER SURFACE TREATMENT

Lasers have been used for cleaning polymer surfaces, micro-fabricating of polymers by ablation, precise cutting. The geometry and dimensions of laser produced features are highly controllable using process parameters, including laser intensity, pulse length and shape, scanning speed and laser shot superposition. In order to optimize the surface characteristics, laser treatment allows partial or complete removing of the superficial polymeric layer without affecting the fiber reinforcement [17-20]. By selecting suitable laser parameters (number of pulse, laser fluence), a fully controlled ablation of the superficial polymer layer can be obtained.

Laser texturing can be performed by individual laser shots or by a mask with a desired pattern. The intensity and interaction time of the laser beam determine the textured volume at the surface which usually changes from a few nanometres to micrometers. Ultrashort pulsed lasers are mostly used, since they facilitate surface modification without changing the bulk properties of the base material. Laser texturing also offers competitive advantages over conventional sandblasting and chemical treatments due to ease of automation, elimination of effluent, lack of contamination and ability for processing three-dimensional parts.

UV lasers are more suitable for polymers as most organic materials adsorb UV radiation, creating photochemical reactions on the surface of the polymer only several molecular layers deep without damaging the bulk polymer [14]. The UV laser etching was, thus, used as a pre-adhesion surface treatment [9, 17-20] with the advantages of chemical and morphological modification and cleaning of the polymer surface with minimal fiber damage.

Excimer laser treatment to control the adhesion performances of glass/epoxy and carbon/epoxy composites can provide a complete cleaning of the surface can be reached after only one laser pulse, Table 4 [20]. This evidenced by the complete removal of fluorine contamination. Three different ablation stages are; weak ablation (150 mJ/m² – 40 pulses), medium ablation (150 mJ/m² – 400 pulses) and total ablation (500 mJ/m² – 500 pulses).

Table 4. Chemical composition (%) of epoxy matrix surface determined with ESCA analyses [20]

	C	O	N	F	Si	S	O/C
Bare surface	56.4	8.1	1.5	32.2	1.8	T	0.14
50 mJ/cm ² – 1 pulse	80.4	12.5	5.6	0.7	0.5	0.5	0.16
150 mJ/cm ² – 4 pulses	76.4	16.9	4.2	-	1.5	-	0.22
150 mJ/cm ² – 10 pulses	78.6	15.9	3.6	-	1.1	-	0.2
150 mJ/cm ² – 40 pulses	77.8	16	5.4	T	-	0.8	0.21
150 mJ/cm ² – 400 pulses	77.4	16.9	5	-	-	0.7	0.22
500 mJ/cm ² – 40 pulses	75.3	15.7	5.8	-	1.9	1.1	0.21

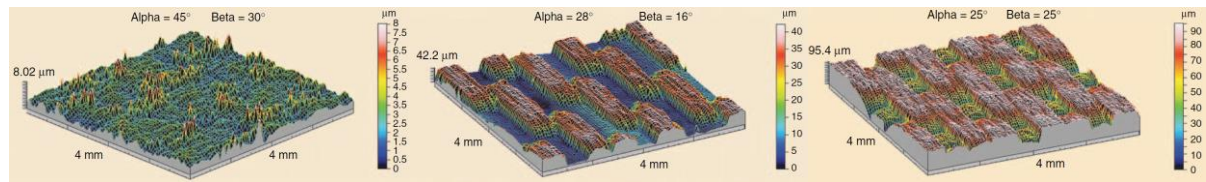


Figure 5 Surface profilometry and average roughness of glass/epoxy surfaces treated with different excimer laser beams conditions: (a) 150 mJ/cm² – 40 pulses (Sa0.6 µm). (b) 150 mJ/cm²–400 pulses (Sa13.1 µm). (c) 500 mJ/cm²–500 pulses (Sa17.2 µm) [20].

The weak ablation mode only provides a surface cleaning with no protrusion of fiber reinforcement or surface roughening, Figure5. The medium ablation rate gives a rough surface which is composed of both fiber reinforcement and epoxy matrix (Figure 3(b)). Finally, the total ablation mode exhibits a complete removal of matrix; the residual surface is then composed only of the fiber reinforcement’s weaving. Laser treatment of these composites exhibits high adhesion performance evidenced by single lap shear tests. The slight fiber protruding obtained on exposing the composites to UV laser irradiation leads to a great increase of lap shear value (approx 30% increase) providing a high performance quality of bonding [20]. However lap shear values decrease on the extreme laser treatment due to

weak boundary layer between superficial fibers exposed to laser beam. This is evidenced by the SEM observations confirming completely ripped off reinforcing fibers. The unlinked remaining fibers causes the premature rupture for such totally ablated samples.

ArF Excimer laser operating at deep UV wavelength (i.e. 193 nm) is shown to enhance adhesion strength by 250% and 450% compared with SiC abrasion treatment and non-treated surfaces respectively [17,18]. This method can effectively be used for various thermoplastic composites and some metallic materials. Laser-treated surfaces induces have chemical changes depending on the fluence on the surface identified by FTIR spectra and XPS analysis [17]. Various contaminants such as Mg and Si present at the non-treated surfaces has been totally

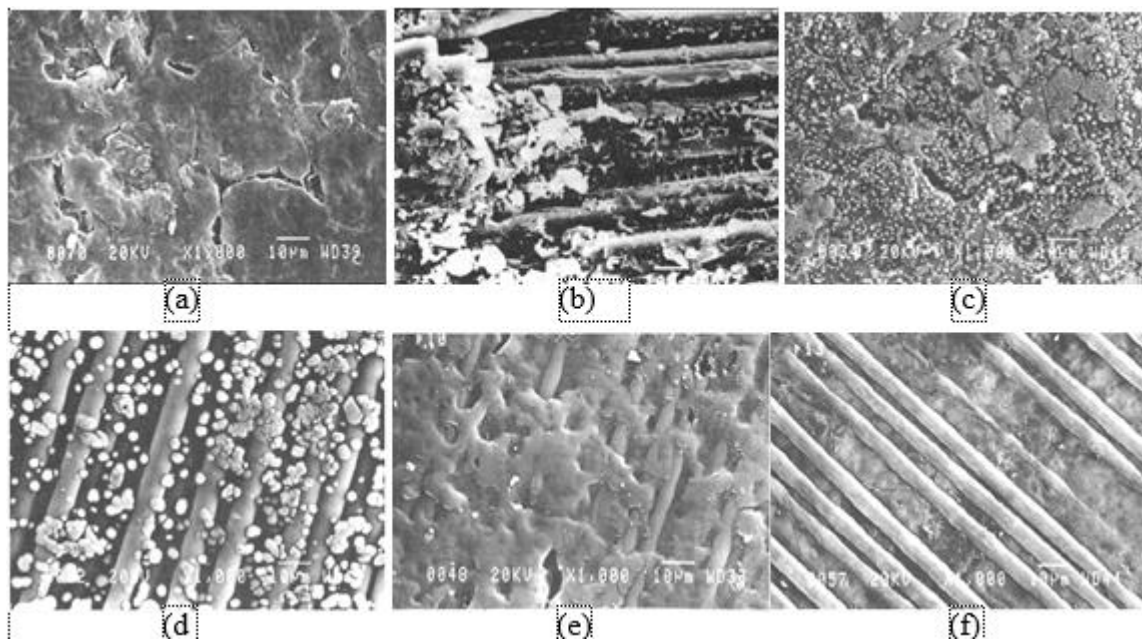


Figure 6. SEM micrographs of PEEK composite surface after treatment at various parameters (a) non-treated. (b) SiC-abraded. (c) laser-treated: 0.18 J/cm², 50 P, (d) 0.18J/cm². 100 P. (e) 1 J/cm², 10 P. (f) 6 J/cm². 10 P [17].

removed with the laser treatment. The improved adhesion can be correlated with the roughening of surfaces, chemical modification, and removal of contaminants. The failure mode is then changed from adhesive to cohesive following laser treatment indicating the improved interfacial adhesion. However effectiveness of the treatment can be reduced above optimum energies and the number of pulses due to ablation and carbonization of the surface [18]. Mechanical properties of the laser treated substrates remains unchanged as the microstructural changes occurred only at superficial outer layers, Figure 6.

SEM micrographs of the nontreated and SiC-abraded PEEK composite adherend are shown in Figure 6.a and b. The surface of the abraded adherent is markedly damaged, cracked and the exposed fibers are broken. SEM micrographs of the PEEK composite adherend after UV laser treatment at different conditions are presented in Figures 6c-f. Effective ablation threshold for the PEEK composite was found to be 0.42 J/cm^2 [23]. Below this value removal of the matrix in the surface region occurs and with high number of pulses rounded granules are formed on the surface. The formation of granules can significantly enlarge the surface area and contribute to better mechanical interlocking of the adhesive to the adherend [16]. Once the matrix is removed, the bare fibers are immune to etching. Above the ablation threshold the composite fibers are observed to etch smoothly. Microparticles and debris redeposit onto the surface leaving a dust-like texture. When the ablation threshold was greatly exceeded, fibers are thinned and buckled, Figure 6.

Excimer laser surface treatment of glass fiber reinforced epoxy polymer composite used by Park et al.[21] was shown to enhance adhesion. The enhanced adhesion mechanism is due to changes by oxidation (from chain of hydrocarbon to polar groups such as carbonyl and hydroxyl) in chemical structure when the treatment is carried out below ablation threshold. The increased surface roughness obtained with ablation above the ablation threshold also greatly contributes the adhesion enhancement. At high energy density, the ablation causes instant fragmentation of polymeric chains, resulting in no oxidation of the surface [24]. Dependence of ablation rate

of the epoxy matrix with number of pulses and laser energy density, Figure 7, means the process can be controlled by selective ablation of epoxy matrix with optimised parameters.

Surface modification of silicon and PTFE using 4th harmonic pulsed Nd:YAG laser (266 nm) is also used to improve wettability and adhesion characteristics [25]. The surfaces treated by Nd:YAG laser irradiation is roughened and the hydrophobicity of silicon and PTFE surface is modified into hydrophilicity. The increased surface roughness proportional to the increase in wettability also improves the adhesion strength of copper spray thin film deposited using Ar^+ laser beam. The improved adhesion is again connected with the oxygen enrichment of the laser treated surfaces. The increased wettability and surface free energy and high percentage of oxygen functional groups through UV laser surface treatment of polymers was also observed by Gotoh et al [22]. The increased wettability and the surface free energy is primarily due to increase in surface oxygen concentration, but the topographical changes may contribute as the surface roughness of UV laser treated PET samples is observed to increase [22]. Laser texturing is also used for pre-adhesive bonding surface treatment of metallic surfaces to enhance adhesion performance by producing microscopic wavy surface morphologies and nanoscopic surface roughness [26]. Similarly texturing of dental surfaces using lasers has been reported to improve bond strength in composite bonding process to these surfaces [27].

4. OTHER APPROACHES

Gas ions has also been used for surface treatment to improve adhesion bonding for preparing the surface of a low adhesion substrates, such as a fluoropolymer [28]. A disbursed layer of fine mesh particles is applied to the surface of a polymer in a controlled fashion by dusting, brushing, or more sophisticated techniques, such as those used for microvoid latex coatings to produce masks, Figure 8.

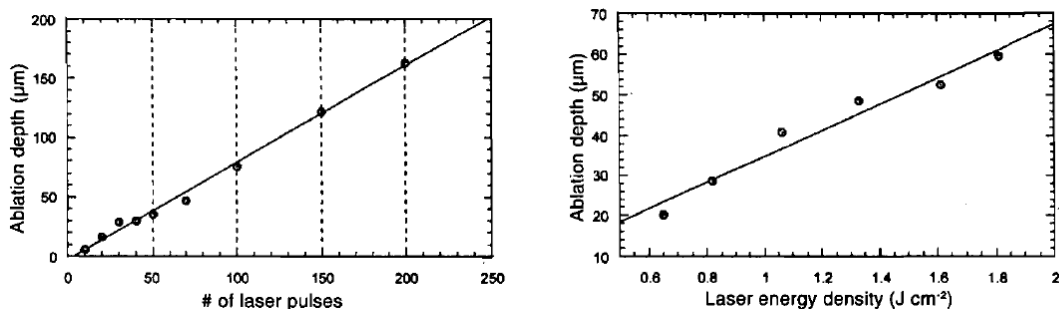


Figure 7. Depths of matrix ablation, (a) as a function of the number of pulses, energy density – 1.01 Jcm^{-2} , pulse frequency – 5 Hz and (b) laser energy density, number of pulses – 50, pulse frequency – 5 Hz, showing linear relationship [21]

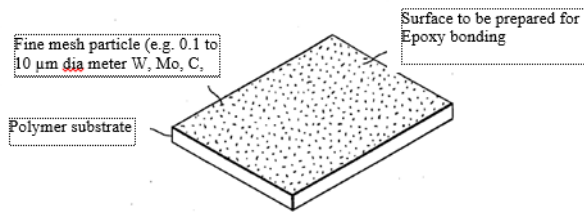


Figure 8. Schematic of polymeric material with low adhesion surface characteristics with randomly distributed surface fine mesh particles [28]

The masked surface is then treated by impinging gas ions located in a vacuum system, Figure 9. The resultant textured surface takes the form of pillars whose vertical dimensions are similar to the masking particles. The etch time ranges from seconds to hours, depending on the surface roughening desired. After ion beam processing the masked particles are removed by washing or dissolving.

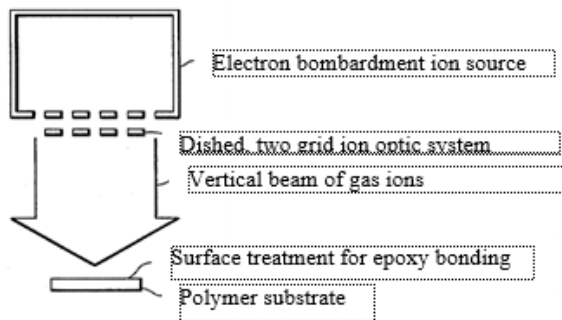


Figure 9. Schematic view of the ion beam texturing apparatus used to texture the surfaces of the polymers [28]

This method was used to texture a fluorocarbon polymer, known commercially as Teflon [28]. The bonded joints tensile yield strengths has significantly increased (in excess of 2,000 psi) as compared to untreated Teflon (less than 180 psi). It is reported that the ion beam textured surfaces produces stronger bond joints than by chemical etch processes.

In another similar approach [29] the particles used to provide texture effects are maintained and the coating is applied on to the particles. In this process a substrate to be structured for a subsequent deposition process is initially coated with two layers of controlled size spheres where the first layer is smaller in diameter than the second layer. The substrate is then heated to melt the first layer of spheres embedding the second layer spheres. The process gives a textured surface corresponding to the shape of embedded spheres. The textured substrate is then ready for the deposition process with any suitable material to form the desired end product. The second layer spheres should necessarily have a higher melting point than the first layer spheres to avoid reflow.

RF sputtering of polymers without masking has also been used to modify surfaces for bond adhesion [30]. The surface texture, resulting from the sputtering, is

controlled only by the chemical nature of the substrate, RF forward power density, and etch time. This process is referred to as natural texturing. Prior to this, Hoepfner [31] described the photolithographic process which utilizes layers or laminates for masking purposes. The masked material is removed by ion bombardment. More recently a different process [32] reported for microalloying and texturing applied on a composite material using laser beam for surface treatment. In this method an alloy micro-powder containing film is sprayed on a composite roller surface. The alloy micro-powder containing film is subsequently melted into the base material to form a new alloy material. The fused film in the substrate and forms textured pits. The method has the advantages of surface microalloying for wear-resistance performances besides deeper textured pits, increased boss height with better control of texturing as compared with the prior laser texturing method.

5. CONCLUSIONS

Different surface treatment methods to improve adhesion performance of composite materials have been evaluated. Surface contaminations originating from manufacturing process, smooth surfaces, low surface energies and wettability impairs the adhesive behaviour the composites. The surface pretreatment of composite materials is important for painting. It is necessary to limit the changes to a thin surface layer to preserve the bulk material properties whilst achieving the above objectives. Particularly composite materials require special considerations when treating their surfaces. There is a danger that some treatments may cause delamination defects just below the surface or damage to the relatively brittle fibres. These defects may result in poorer mechanical properties of the composite.

Important factors to be considered include removing surface contamination such as silicones and fluorocarbons. The bulk mechanical properties of the composite can be affected by abrasive surface treatments like alumina grit-blasting and silicon carbide abrasion. Corona discharge and plasma treatments will cause chemical changes and roughening of the composite surfaces. These methods also introduce oxygen functional groups onto the composite surface, resulting in improved wetting of the surface.

The UV laser irradiation as a surface treatment is effective and has advantages compared to other conventional treatments such as chemical etching, abrasive blasting and plasma treatments. Laser treatment allows partial or complete removing of the superficial polymeric layer without affecting the fiber reinforcement. Excimer laser treatment has been used for composite surfaces to control adhesion performances. The laser parameters (laser fluence, number of pulses) have to be carefully selected to achieve suitable surface characteristics. The general phenomena observed due to laser treatment are surface cleaning by removal of contamination and weak boundary layers through

evaporation, modification of surface chemistry by imposing oxide derivatives and hydroxides, and change of surface morphology by introduction of uniform roughness. Consequently, important considerations such as cleanliness, mechanical interlocking, chemical attraction and wettability affecting the adhesion performance can all be satisfied for by laser treatment method.

REFERENCES

- [1] H. Yaghoubi, N. Taghavinia, and E. K. Alamdari, "Self cleaning TiO₂ coating on polycarbonate: Surface treatment, photocatalytic and nanomechanical properties," *Surface and Coatings Technology*, 204: 1562-1568.
- [2] K.L.Mittal, *Polymer surface modification: relevance to adhesion 2*: (2000).
- [3] T.L.See, Z. Liu, S. Cheetham, S. Dilworth, L. Li Laser abrading of carbon fibre reinforced composite for improving paint adhesion, *Applied Physics A*, 117(3): 1045-1054.
- [4] M. F. Q. Benard, M. Grisel, P. Laurens, F. Joubert, "Influence of the Polymer Surface Layer on the Adhesion of Polymer Matrix Composites," *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 22: 51-61, (2009).
- [5] A. J. K. G. K. A. KODOKIAN, "Surface pretreatment and adhesion of thermoplastic fibre-composites," *Journal of Materials Science Letters*, 7: 625-627, (1988).
- [6] T. M. S. Iannace, F. Bellucci, L. Ambrosio, L. Nicolais, "Effect of RF plasma treatment on adhesion of hydrophilic matrix reinforced composites," in *Proceedings of the European Conference on Advanced Materials and Processes*, 663-370, (1995).
- [7] F. Caiazzo, P. Canonico, R. Nigro, and V. Tagliaferri, "Electrode discharge for plasma surface treatment of polymeric materials," *Journal of Materials Processing Technology*, 58: 96-99, (1996).
- [8] S. K. Om, "Plasma surface engineering of plastics," *Surf. Eng. Nonmetallic Mater*, 6: 892-899, (1993).
- [9] P. Davies, C. Courty, N. Xanthopoulos, and H. J. Mathieu, "Surface treatment for adhesive bonding of carbon fibre-poly(etherether ketone) composites," *Journal of Materials Science Letters*, 10: 335-338, (1991).
- [10] K. D. V. A. Baalman, E. Born, A. Gross, "Surface Treatment of Polyetheretherketone (PEEK) Composites by Plasma Activation," *The Journal of Adhesion*, 46: 57-66, (1994).
- [11] C. K. Jung, I. S. Bae, S. B. Lee, J. H. Cho, E. S. Shin, S. C. Choi, and J. H. Boo, "Development of painting technology using plasma surface technology for automobile parts," *Thin Solid Films*, 506-507: 316-322, (2006).
- [12] C. L. H. L.W.Crane, L.Maus, "Surface treatment of cured epoxy graphite composites to improve adhesive bonding," *SAMPE Journal*, 12: 6-9, (1976).
- [13] M. F. Q. Be'nard, M.Grisel, "Influence of Fibre Reinforcement and Peel Ply Surface Treatment Towards Adhesion of Composite Surface," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 24: 404-409, (2005).
- [14] J. R. J. Wingfield, "Treatment of composite surfaces for adhesive bonding," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 13: 151-156, (1993).
- [15] C. M. T. A.J. Kinloch, "The adhesive bonding of thermoplastic composites," *Journal of Adhesion*, 21: (1987).
- [16] R. M. W. B.M. Parker, "Surface pretreatment of carbon fibre reinforced composites for adhesive bonding," *Composites*, 13: (1982).
- [17] J. Z. M. Rotel, A. Buchman, H. Dodiuk, "Pre-adhesion Laser Surface Treatment of Carbon Fiber Reinforced PEEK Composite," *The Journal of Adhesion*, 55: 77-97, (1995).
- [18] J. Z. M. Rotel, S. Tamir, A. Buchman, H. Dodiuk, "Pre-bonding technology based on excimer laser surface treatment," *Applied Surface Science*, 154: 610-616, (2000).
- [19] M. F. Q. Be'nard, M. Grisel, P. Laurens, "Excimer Laser Surface Treatment as an Innovative Way to Control Composite Materials Adhesion Performance," in *7th Euradh Freiburg*, Germany, 132-137, (2004).
- [20] M. F. Q. Be'nard, M. Grisel, P. Laurens, "Surface Treatment of Carbon-Epoxy and Glass-Epoxy Composites by an Excimer Laser Beam," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 26, 543-549, (2006).
- [21] K. M. J. K. Park, "Excimer Laser Surface Treatment of Sheet Molding Compound for Adhesive Bonding," *Materials and Manufacturing Processes*, 13: 359-368, (1998).
- [22] S. K. K. Gotoh, "Improvement of wettability and detergency of polymeric materials by excimer UV treatment," *Colloid Polymer Science*, 283: 1356-1360, (2005).
- [23] S. T. L. P.E. Dyera, G.A. Oldershawa, D. Schudela, "An investigation of XeCl laser ablation of polyetheretherketone (PEEK)-carbon fiber composite," *Journal of Materials Research*, 7: 1152-1157, (1992).
- [24] S. M. J. Breuer, G. Sepold, "Photolytic Surface Modification of Polymers with UV-Laser Radiation," *Journal of Adhesion Science and Technology*, 9: 351-363, (1995).
- [25] K. L. D. Kim, C. Lee, "Surface modification of silicon and PTFE by laser surface treatment: improvement of wettability," in *Proceedings of SPIE*, Bellingham, WA, (2003).
- [26] A. M. E. S. F. Y. Sakata, W. Miyakawa, R. Riva, M. S. F. Lima, "Influence of laser surface texturing on surface microstructure and mechanical properties of adhesive joined steel sheets," *Surface Engineering*, 25: 180-186, (2008).
- [27] M. H. A. Samad-Zadeh, A. Belikov, K. V. Shatilova, A. Skripnik, P. Stark, C. Egles, G. Kugela, "The influence of laser-textured dentinal surface on bond strength," *Dental Materials*, 27: 1038-1044, (2011).
- [28] B. A. Banks, "Surface Texturing of Fluoropolymers," US: 4344996, The United States of America as represented by the Administrator of the National Aeronautics and Space Administration, (1982).
- [29] S. R. S. Matsuba, "Unifrom Surface Texturing PVD/CVD Hardware," US: 0150687 A1, Novellus Systems, (2002).

- [30] J. M. N. Junkichi, "Process for surface treating molded articles of fluorine resins," US: 4064030, Nitto Electric Industrial Co., Ltd. Ibaraki, JP (1976).
- [31] J. Hoepfner, "Process for the production of etched structures in a surface of a solid body by ionic etching " US: 4092210, Siemens Aktiengesellschaft (Berlin & Munich, DT) (1976).
- [32] H. L. D. HU, D. WAN, "Roller surface laser texturing and micro-alloying composite processing method " CN: 101117712, Univ Shanghai Jiaotong, (2007).

Operate With a Gasoline Internal Combustion Engine Evaluation of Different Boron Addition of The Fuel Additive Inside Performance and Emissions Impact

Ahmet Ali SERTKAYA* and Talip AKBIYIK**

*Necmettin Erbakan University, Faculty of Seydişehir Ahmet Cengiz Engineering, Department of Mechanical Engineering, 42360 Konya, Turkey.

**Necmettin Erbakan University, Seydisehir Vocational College Automotive Program 42360 Konya, Turkey

(Received : 28.07.2016 ; Accepted : 31.08.2016)

(The main results of the present paper have been exhibited in ICENS 2016 International Conference on Engineering and Natural Science May 24-28, 2016 Sarajevo, Bosnia and Herzegovina. This paper is extended version of the presented study)

ABSTRACT

Most of today's car engines use fossil based fuels which is estimated to run out in a period of 50-60 years. Scientists are also researching ways to improve the performance of existing fuels and reduce emissions to the environment on the one hand while trying to provide an alternative to petroleum-based fuels on the other hand. They come from gasoline and diesel fuels to reduce harmful emissions to the environment and one of the most studied subjects of increasing fuel efficiency values. In this study, boron additives were added to petroleum based fuel and used in a gasoline-powered internal combustion engine in order to investigate their effects on engine fuel temperature, fuel consumption, engine performance as well as emission levels. Experimental studies were conducted in the laboratory by using a gas powered internal combustion engine (Lombardini LGW 523) operated at 1500 rev/min – 5000 rev/min to determine whether there are any changes in terms of increased engine performance (power, torque and fuel consumption) and low levels in emissions (HC, CO, CO₂, and O₂).

Keywords: Fuel additives, boron, exhaust emission.

1. INTRODUCTION

Most of the internal combustion engines used nowadays use petroleum based fuels. However; due to the fact that fossil fuel source is at a limited quantity that will eventually be used up completely, researchers have embarked on studying alternative energy sources that will take over petroleum based fuels in future. In addition, the exhaust gas emissions that pollute environment as a result of usage of petroleum fuels, has further intensified the researches towards alternative energy resources. Together with these researches, studies are conducted to improve the fossil fuels quality by adding some additives that aim at improving engine performance and lowering exhaust emissions. Several researchers have shown interests in investing in this area [1]. Some of these are as given below. Zhang at al. have investigated experimentally the combustion characteristics and particulate matter emission of a SI gasoline engine when ultralow sulphur gasoline and methanol are used at the urban-speed of 2000 rev/min under low to high engine conditions. The following results can be obtained from the current study. For the methanol fuel, it has been observed that the cylinder gas pressure and heat release rate occurred earlier by the use of methanol-gasoline test fuels when compared to the ultralow sulphur gasoline. The use of methanol increases the ignition delay but has no significant influence on the combustion duration. Particulate number and mass

concentration decreased in low proportion methanol-gasoline while increased significantly in high proportion methanol-gasoline. The particulate size distribution curves are all triple-modal in shape and the size distribution slightly shifts toward larger size (leading to large geometric mean diameter) with all the test fuels. For each testing fuel, the particulate number concentration in nucleation increased with the increase of engine load, while the number of particles in accumulation decreased from low to high vehicle loads [2]. Elfasakhany has investigated the effect of using different n-butanol blends on CO, CO₂ and UHC emissions, in-cylinder pressure, exhaust gas temperature, volumetric efficiency, brake power and torque of SI engine in the experimental research. The researcher showed that the n-butanol addition to gasoline fuel can significantly improve blends combustion due to its partially oxidized nature and a leaning effect caused by its lower stoichiometric air-fuel ratio. The higher the rate of n-butanol in the mixture, the lower the emissions and engine performance. The performance of 10% voln-butanol is lower than gasoline by about 5.6%, 2.5%, 6.6%, 8.3% and 3.5% for the exhaust gases temperature, engine torque, brake power, in-cylinder pressure and volumetric efficiency, respectively. At low speed, emissions of gasoline are greater than blends by about 43%, 32% and 26% for CO₂, CO and UHC, respectively; however, at moderate speed, the emissions of gasoline are higher by about 40%, 6% and 11%, respectively; at high speed, CO₂ of neat gasoline is higher than blends by about 27%, while CO and UHC become in the same order of magnitude for

*Corresponding Author

e-mail: alisertkaya@hotmail.com

Digital Object Identifier (DOI) : 10.2339/2016.19.4 633-640

gasoline and blended fuels [3]. Forson et al. conducted an experimental investigation in order to explore the performance of jatropha oil and its fuel blends with diesel in a direct-injection single-cylinder diesel engine. The test showed that jatropha oil could be conveniently used as a diesel substitute in a diesel engine. The test further showed increases in brake thermal efficiency, brake power and reduction of specific fuel consumption for jatropha oil and its blends with diesel generally, but the most significant conclusion from the study is that the 97.4% diesel/2.6% jatropha fuel blend produced maximum values of the brake power and brake thermal efficiency as well as minimum values of the specific fuel consumption [4]. Liu et al. performed experiments to study the effect of two-stage injection on combustion and emission characteristics under high EGR (46%) condition. Four different fuels including pure diesel and blended fuels of diesel/gasoline, diesel/n-butanol, diesel/gasoline/n-butanol were tested. They found that blending gasoline or/and n-butanol in diesel improves smoke emissions while induces increase in maximum pressure rise rate (MPRR) [5]. Yilmaz et al. carried out studies using diesel oil, biodiesel and ethanol blends in a diesel engine. The experiments were performed by varying ethanol concentration from 3% to 25%. It was observed that there is a small increase in engine exhaust temperature and CO emissions with the increase of ethanol concentration. NO_x emissions were reduced for all loads with the increase of ethanol concentration, and unburned HC emissions were dependent on engine operating conditions and ethanol concentration, increasing for 25% ethanol at low loads and decreasing at high loads [6]. Deng et al. investigated the combustion heat release on a single cylinder, high speed SI engine fuelled with butanol/gasoline blend. The results showed that butanol provides higher knocking resistance by allowing in advance the ignition timing in SI engines, leading to more efficient combustion [7]. Armas et al. evaluated the emissions of a diesel engine using blends of 90% diesel oil and 10% ethanol. The authors explain that the effects of ethanol on NO_x emissions do not follow a specific pattern and are dependent on engine operating conditions, among other factors. The results showed a small increase of NO_x emissions with the use of ethanol, in comparison with diesel oil. CO emissions were reduced with the use of ethanol, especially at high loads, justified by the improvement of combustion quality through the increase of oxygen presence in the fuel. The results indicate that there is a significant reduction in PM emissions and smoke opacity, and little effect on HC and carbon dioxide (CO₂) emissions [8].

In their experimental study on a single cylinder motorcycle engine, Fenget al operated the engine for two operating modes of full load and partial load at 6500 rpm and 8500 rpm with pure gasoline and 35% volume butanol-gasoline blend. The results showed that engine torque, BSEC, CO emissions and HC emissions are better than that of pure gasoline at both full load and partial load with 35% volume butanol and 1% H₂O addition,

combined with the modified ignition timing. However, NO_x and CO₂ emissions are worse than that of the original level of pure gasoline [9]. In another study conducted by El-Kassaby the effects of ethanol-gasoline blends on SI engine performance were investigated. The performance tests were conducted using different percentages of ethanol-gasoline up to 40% under variable compression ratio conditions. They found that engine indicated power improved with the ethanol addition, the maximum improvement occurring at 10% ethanol and 90% gasoline fuel blend [10]. Putrasari et al. investigated several engine parameters i.e. power, brake specific fuel consumption, brake thermal efficiency, the exhaust gas temperature, and lubricating oil temperature. As a complement of the experiment, the exhaust emission characteristic of CO, HC and smoke were also investigated. The results indicate that the engine power and the indicated mean effective pressure increase with increasing of ethanol [11]. Oliveira et al. carried out investigation involving the effects of fuel blends containing 5, 10 and 15 wt.% of anhydrous ethanol in diesel oil with 7% of biodiesel (B7) on performance, emissions and combustion characteristics of a diesel power generator. The results were compared with standard B7 operation and showed that in in-cylinder peak pressure and heat release rate were decreased at low loads and increased at high loads with the use of ethanol [12]. Arpa et al. performed experimental investigation to determine effects of gasoline-like fuel (GLF), and its blends with turpentine with ratios of 10%, 20%, and 30% on the performance and emission characteristics of a gasoline engine. The most important conclusions obtained from this experimental study are presented here. The turpentine itself should not be used as a fuel since large amount (85%) of it distillates at very narrow temperature band. The turpentine dissolves in the GLF, and blends of the GLF with turpentine behave as a unique fuel. Increasing amount of turpentine in the GLF sample had positive effects on the performance parameters. It was observed that the GLF and blends of the GLF with the ratio of 10%, 20% and 30% of turpentine could be used as a fuel in the SI engines without any problems according to the test results [13].

The objective of this study is to investigate effects of different boron additives in fuel on engine power and exhaust emission levels. With this aim, four different boron compounds were blended with gasoline and their respective effects studied. In the first phase of the experiments, four different boron additives were added into the fuel at the ratios of 0.7%, 1.4% and 2.1% after which the engine torque values for each one were compared. On average, it was found that there is an increase in engine torque when the boron-mixed fuel is used of 0.9% for the 0.7% boron additive, 0.4% for 1.4% and 0.5% torque increase for the fuel with 2.1% boron addition. In the second phase, engine performance and emission level evaluation of the fuel having the highest torque (i.e. the one with 0.7% boron additive) were carried out.

2. MATERIALS AND METHOTS

A two-cylinder gasoline engine with spark plug ignition mode was used in the experiments. The loading and measuring of the engine moment were executed with an electric dynamometer. Engine fuel consumption was monitored with a universal fuel meter. As for exhaust emissions, a gas analyser was used. The tests were carried out under suitable atmospheric conditions as per TS 1231 standards. The experimental set up is shown in Figure1. The experimental setup consists of electric dynamometer, control panel, motor, exhaust emission device, drive, mass- based fuel meter, brake resisting module and a personal computer that stores the data. The dynamometer is formed of an AC induction servo motor (26 kW), drive and braking module.

measuring torque and fuel levels and the digital inlets and outlets of the drive. Lombardini LGW 523 MPI type two-cylinder, four-stroke, spark ignition internal combustion engine that has multiple injections was used for the experiments. Its technical specifications are given in Table 1 while its schematic view is presented in Figure 2.

Table 1. Engine specifications

Manufacturer	Lombardini LGW 523 MPI
Number of cylinders	2
Cylinder Volume	505 cm ³
Cylinder diameter	72 mm
Stroke	62 mm
Compression ratio	8.7:1
Motor power	15 kW 5000 rev/min
Engine torque	37 Nm 2200 rev/min

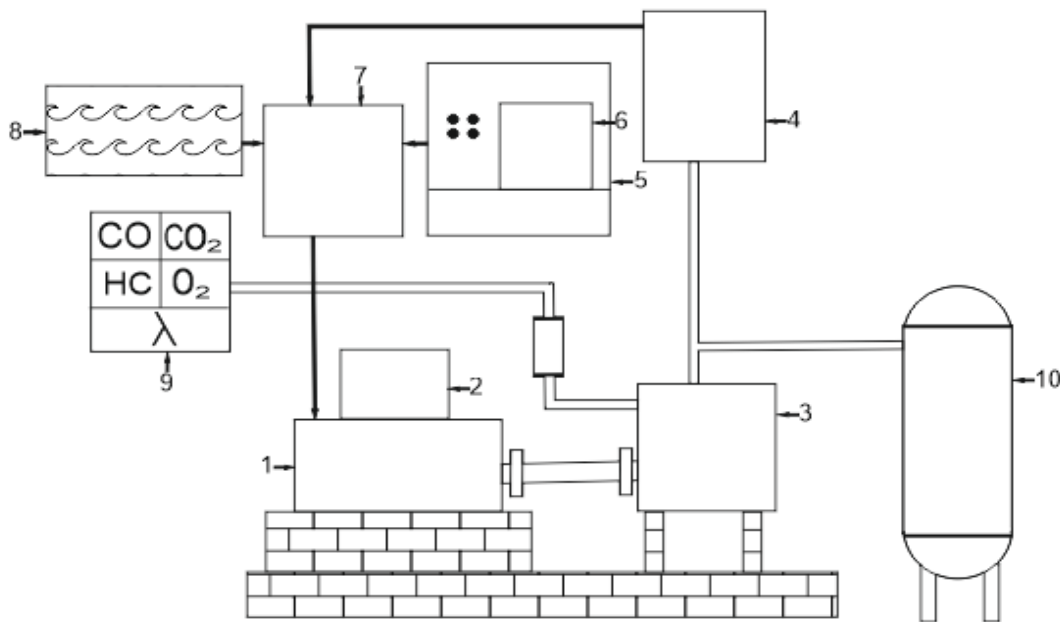


Figure 1. Experimental setup 1. Dynamometer, 2. Dynamometer cooling system, 3. Motor 4. Mass flowmeter, 5. Control panel, 6. Computer, 7. Drivers, 8. Resistance, 9. Emission device, 10. Fuel tank.

The device can reach a maximum rotational speed of 9500 rpm and has a braking torque of 0-83 N.m at an accuracy of ± 1 Nm. An S type load cell was used to measure dynamometer torque at the device’s handle. A rotary encoder was employed to measure rotational speed of the motor. Cooling of the dynamometer was of forced air cooling system type sourced from an AC induction motor. A cardan coupling was incorporated between the motor and dynamometer in order to provide some flexibility between the two components. Fuel consumption’s measuring system is expressed in terms of gr/s and gr/HP units. It can operate clockwise or counter clockwise and when the brake is engaged or when the driving mode is on.

With the data acquisition and controlling unit, measurements of various parameters and their calculations can be screen captured on real time basis on the computer screen. This unit contains plugs of thermocouples measuring the temperature, load cell



Figure 2. Experimental engine

The fuel used in the experiments was 95 octane gasoline while engine oil was 10W 40. The engine oil and filter were replaced for every test. Prior to starting the tests, the engine was run empty up to operating temperature and after being warmed up (when the radiator fan operates), the measurements were taken. During the tests under load, the engine was operated starting with a speed

of 1500 rpm up to 5000 rpm at 8 different cycles. Then after the engine reaches a steady state 60 data were recorded and their averages taken.

Table 2. Test engine specifications

Parameter	Measurement Range	Accuracy
CO	0-10 %	0.01
CO ₂	0-20 %	0,01
HC	0-20000 ppmV	1
O ₂	0-5000 ppm	0,01
λ	0-5	

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, effects of various boron additives added into fuel on engine power and emission were

investigated. 4 different boric compounds designated as A, B, C and D were added into gasoline fuel at the rate of 0.7%, 1.4% and 2.1%. In figure 3.6 variation of torque-motor with speed is shown. It was observed that up to the engine speed of 2500 rpm the increase in torque matches with the gasoline, however; at higher enginespeeds, the torque was seen to drop below the gasoline value. Sample A additive has exhibited an increase in averages of all cycles at the values of 0.7% and 2.1% while recording a decrease at 1.4%. Samples B and C exhibited increasing trend in all values whereas sample D marked increase at 0.7% but underwent a decreasing trend in the rest of the values. It was found that when the mean values of the different A,B,C and D boron additives are taken, an increase of 0.9% in torque at 0.7% addition, 0.4% increase at 1.4 % addition and 0.5% torque increase at 2.1% addition of the additive were recorded.

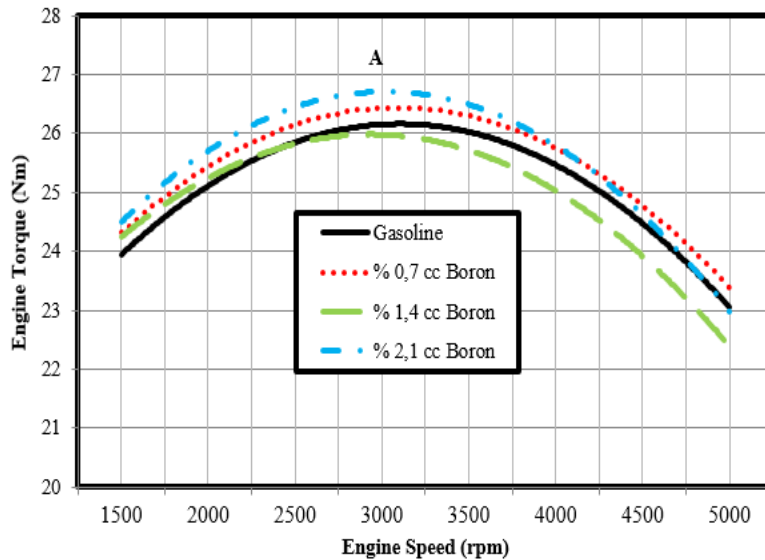


Figure 3. Torque-motor speed change for A

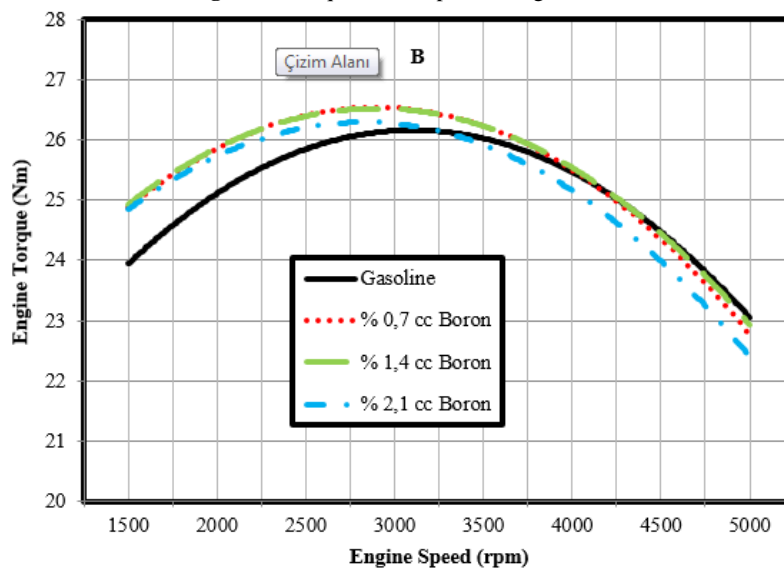


Figure 4. Torque-motor speed change for B additive

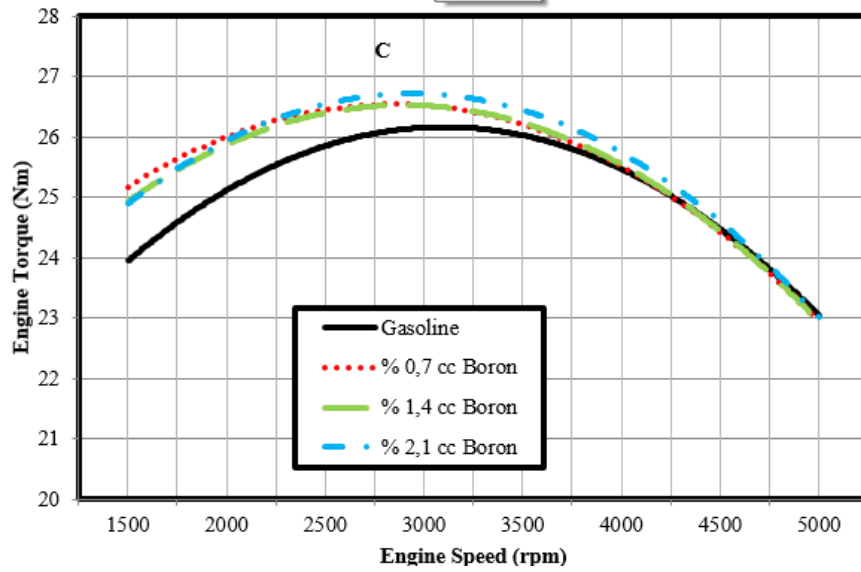


Figure 5. Torque-motor speed change for C additive

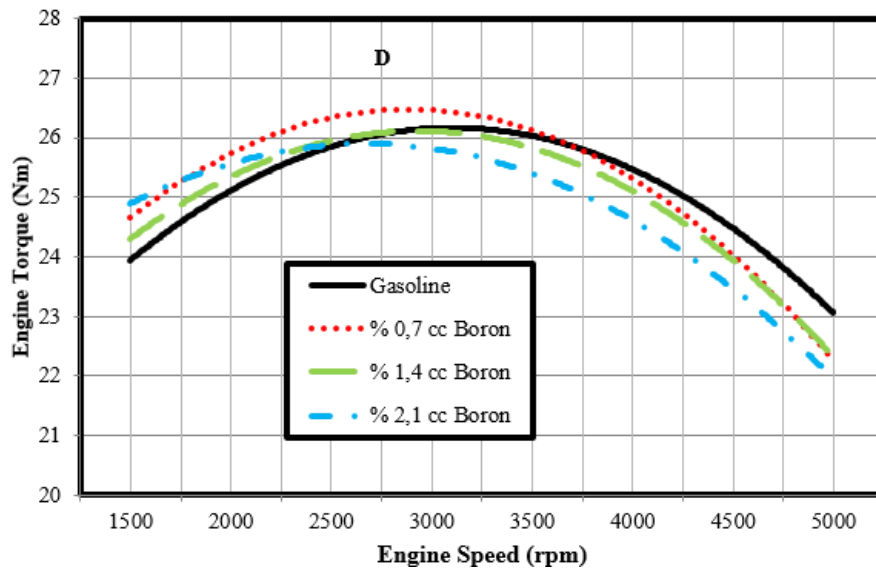


Figure 6. Torque-motor speed change for D additive

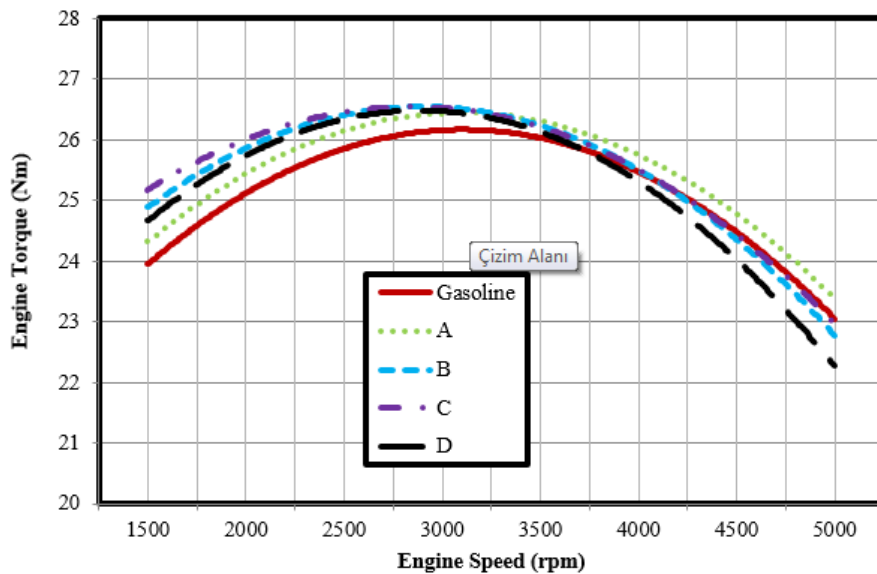


Figure 7. Torque-engine speed changes for 0.7% boron additive into gasoline

additive has shown as compared to the other ratios, the performance and emission values belonging to this additive were studied.

Specific fuel consumption curves of fuel additives at different ratios are shown in Figure 9. Specific fuel consumption which is an important performance

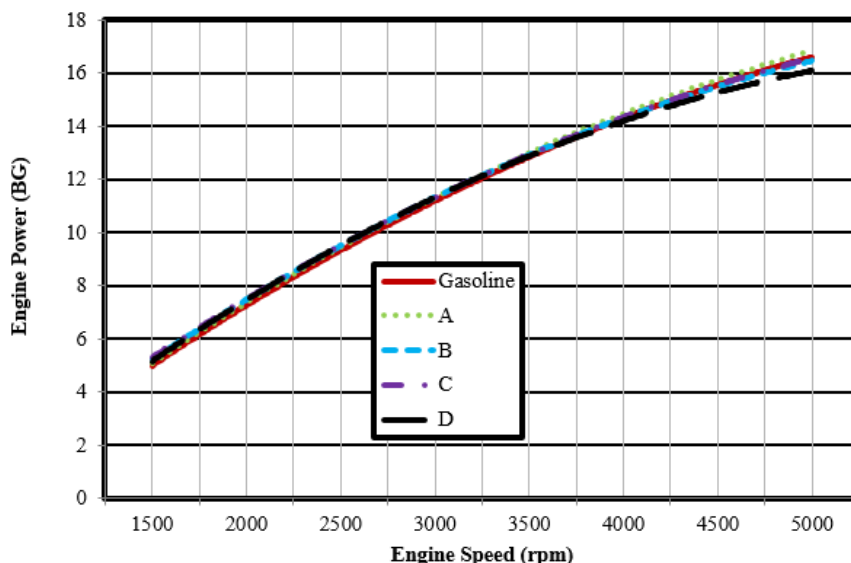


Figure 8. Engine power- engine speed changes for 0.7% boron additive into gasoline

Due to the linear relationship between power and torque values, the power and torque values belonging to A boron additive in all cycles are higher with respect to gasoline. The highest difference ratio recorded was at 4500 rpm whereas the lowest was at 3500 rpm. At engine speeds of 3500, 4500 and 5000 rpm sample B additive was relatively lower with respect to the gasoline. The highest difference ratio occurred at 2000 rpm. At the speeds of 4000 and 5000 rpm, additive C dropped when compared with the gasoline. The largest difference ratio in this one was at 2000 rpm. As for additive D, between the engine speeds of 3500 and 5000 rpm all the values were low with respect to gasoline. The largest difference occurred at 2000 rpm. Average power increase of the additives in all the operating cycles were 1.1% for additive A, 1% for additive B, 1.3% for additive C and 0.2% for additive D.

criterion, refers to the amount of fuel per horse power taken from the engine in one hour. In all the additives, the specific fuel consumption has shown a decreasing trend in certain cycles although most of them increased with gasoline. While an increase in fuel consumption was observed in additive A at 1500, 4000 and 5000 rpm, the least fuel consumption was spotted at 2000 rpm. Additive B has shown fuel consumption increase at 2000, 3000 and 4000 rpm whereas its least fuel consumption was recorded at 1500 rpm. As for additive C, fuel consumption was seen to increase at 3000 and 3500rpm engine speeds, the lowest fuel consumption was at 3500 rpm. Additive D underwent fuel consumption increase at 1500, 3000 and 5000 rpm speeds with the least consumption appearing at 3500 rpm. When the averages of fuel consumption is studied, it is found that under all

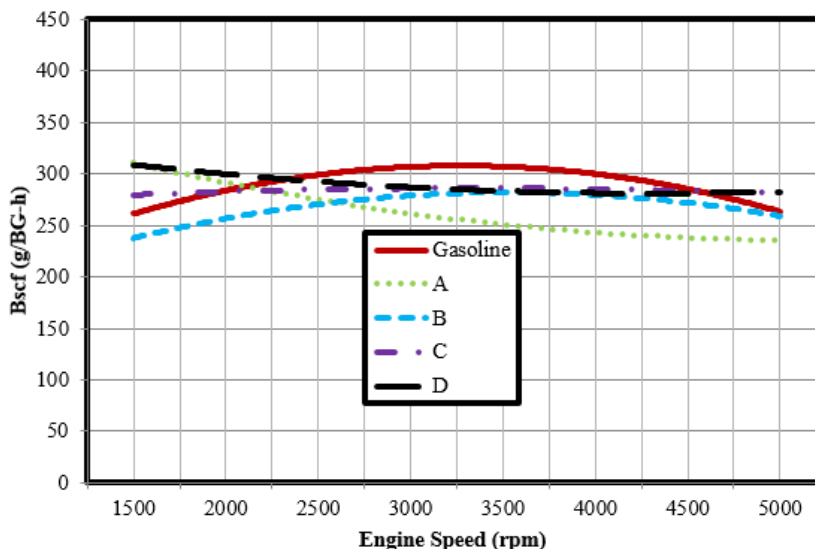


Figure 9. Specific fuel consumption - engine speed changes for 0.7% boron additive into gasoline

speeds, additive A exhibited a decrease of 5% while additives B, C and D recorded decreases of 6%, 15% and 3% respectively.

engine speed. It was only in additive A where an increase in HC was observed at engine speeds of 1500 and 2500 rpm. HC emissions are specifically caused by the cold

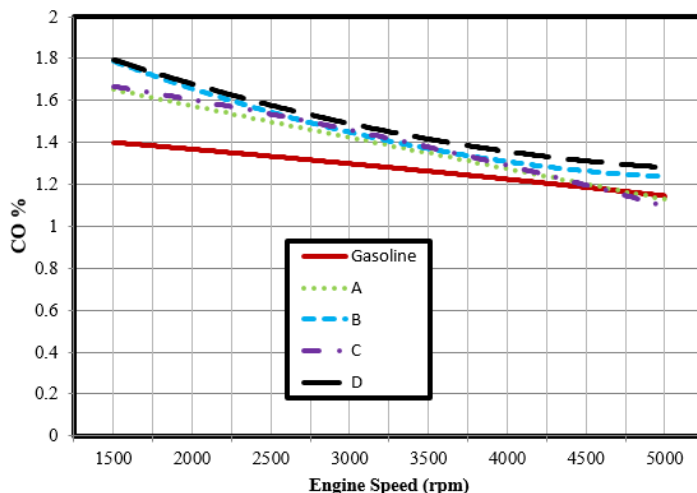


Figure 10. Carbonmonokside - engine speed changesfor 0.7% boron additive into gasoline

Carbon monoxide (CO) emissions are exhaust products appearing as a result of insufficient air for fuel combustion or an outcome of less than the necessary time needed for burning the fuel completely. Therefore, among the exhaust emissions, the concentration of CO mostly depends on the engine’s operating conditions and air-fuel mixture. Figure 10 shows the variation of CO emissions with engine speeds. When the CO emissions are investigated, it is seen that under all operating speeds additive A shows a reduction of 2.8%, B additive 1.2% increase, additive C exhibits 0.3% reduction and D indicates an increase of 5.3% on average.

In figure 11, variation of hydrocarbon (HC) emission with engine speeds is given. In all the additives used in the experiments, it was found that the HC emission values tend to decrease depending on the increase in

zones around the engine cylinder walls. As explained in CO emissions, depending on engine speed, an increase in the turbulence within the engine cylinders will provide perfect combustion in the engine therefore reducing the HC emissions as the engine speed increases. By studying the HC emissions, it is seen that in all the additives, a decreasing trend with respect to gasoline is observed.

4. RESULTS

In this study, effects of fuel blended with boric additives on engine performance and exhaust emissions were studied where the gasoline fuel with 0.7% boric additive was used for the study as it exhibited the best results after comparing engine torque values resulted from other blends of 1.4% and 2.1% of boron available in markets. The tests were conducted on a two-cylinder spark

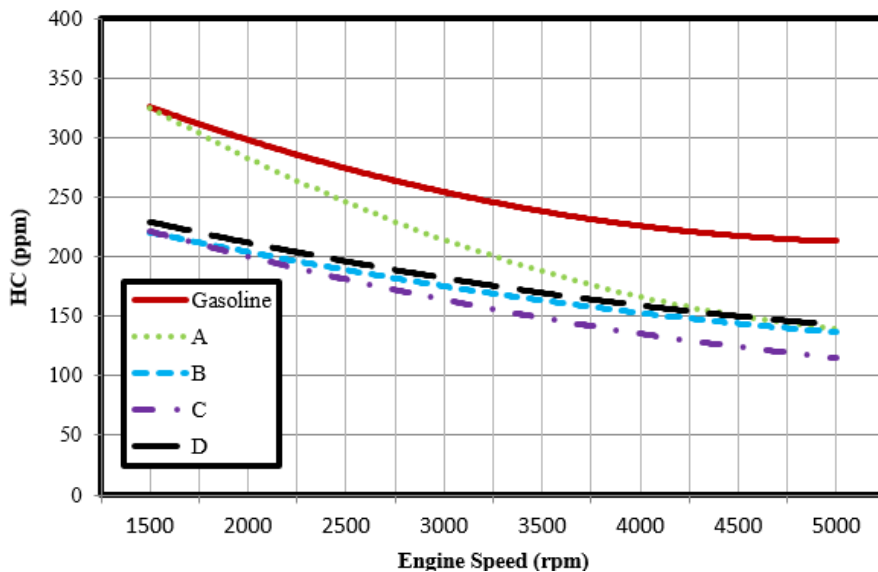


Figure 11. Hydrocarbon - engine speed changesfor 0.7% boron additive into gasoline

ignition engine under full load that was operated at various operating speeds. There has been claims that there is a fuel additive sold around stores that is economic, improves engine performance, reduces exhaust emissions and cleanses engine cylinders. However; based on the obtained experimental results, no linear increase or decrease was observed for any value, instead it was found that there are some variations depending on engine speeds. The best result of the averages of power and torque was observed in additive B at an engine speed of 2000 rpm with an increase of 5.8%. As with fuel consumption values, no linear increase or decrease was observed, but rather reduction on some values. The best result was spotted on additive C with 32 % decrease at engine speed of 3000 rpm. However, in terms of HC and CO emissions, a remarkable decrease was found. Above the speed of 3000 rpm, reduction in power and torque based on gasoline was observed. No significant increase could be observed in power and torque as the engine speed increased. In terms of fuel consumption, when all the speeds are investigated, the highest value obtained seems to be 5.8%. However, reduction was not found at every engine speed. Especially at the engine speed of 3000 rpm, the lowest torque and power values were obtained based on gasoline supplied and more fuel was consumed.

FUNDING

This work was supported by the Coordinatorship of Necmettin Erbakan University's Scientific Research Office with contract nos.:142028002.

REFERENCES

1. Çelikten, İ., Karaaslan, E., Solmaz, H., Okur, M., Polat, S., "Experimental investigation of the effects of gasoline additives on engine performance and exhaust emissions", *J. of Thermal Science and Technology*, 35(1): 87-95, (2015).
2. Zhang, H., Geng, P., Yang, S., "Experimental investigation on the combustion and particulate matter (PM) emissions from a port-fuel injection (PFI) gasoline engine fueled with methanol-ultralow sulfur gasoline blends", *Fuel*, 145: 221–227, (2015).
3. Elfasakhany, A., "Experimental study on emissions and performance of an internal combustion engine fueled with gasoline and gasoline/n-butanol blends", *Energy Conversion and Management*, 88: 277–283, (2014).
4. Forson, F.K., Oduro, E.K., Hammond-Donkoh, E., "Performance of Jatropha oil blends in a diesel engine", *Renewable Energy*, 29: 1135–1145, (2004).
5. Liu, H., Zheng, Z., Yue, L., Zhu, Y., Zhong, X., Yao, M., "Effect of two-stage injection on combustion and emissions under high EGR rate on a diesel engine by fueling blends of diesel/gasoline, diesel/n-butanol, diesel/gasoline/n-butanol and pure diesel", *Energy Conversion and Management*, 90: 1–11, (2015).
6. Yilmaz, N., Vigil, F.M., Donaldson, A.B., Darabseh, T., "Investigation of CI engine emissions in biodiesel-ethanol-diesel blends as a function of ethanol concentration", *Fuel*, 115: 790–793, (2014).
7. Deng, B., Fu, J., Zhang, D., Yang, J., Feng, R., Liu, J., Li, K., Liu, X., "The heat release analysis of bio-butanol/gasoline blends on a high speed SI (spark ignition) engine", *Energy*, 60: 230-241, (2013).
8. Armas, O., García-Contreras, R., Ramos, A., "Pollutant emissions from New European Driving Cycle with ethanol and butanol diesel blends", *Fuel Process Technol*, 122: 64–71, (2014).
9. Feng, R., Yang, J., Zhang, D., Deng, B., Fu, J., Liu, J., Liu, X., "Experimental study on SI engine fuelled with butanol-gasoline blend and H₂O addition", *Energy Conversion and Management*, 74: 192–200, (2013).
10. Al-Kassaby, M.M., "Effect of using differential ethanol-gasoline blends at different compression ratio on SI engine", *Alexandra Eng. J.*, 32 (3): 135–142, (1993).
11. Putrasari, Y., Nur, A., Muharam, A., "Performance and emission characteristic on a two cylinder DI diesel engine fuelled with ethanol-diesel blends", *Energy Procedia*, 32: 21–30, (2013).
12. Oliveira, A., Morais, A.M., Valente, O.S., Sodr , J.R., "Combustion characteristics, performance and emissions from a diesel power generator fuelled by B7-ethanol blends", *Fuel Processing Technology*, 139: 67–72, (2015).
13. Arpa, O., Yumrutas, R., Alma, M.H., "Effects of turpentine and gasoline-like fuel obtained from waste lubrication oil on engine performance and exhaust emission", *Energy*, 35: 3603-3613, (2010).